

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## VIZUALIZACE AKUSTICKÝCH POLÍ POMOCÍ LASEROVÉ INTERFERENCE

ACOUSTIC FIELDS VISUALIZATION USING LASER INTERFERENCE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tobiáš Raffay

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Skalský

BRNO 2021



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Tobiaš Raffay

**ID:** 211171

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vizualizace akustických polí pomocí laserové interference

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je experimentální sestava umožňující vizualizaci akustického vlnění ve vzduchu pomocí interference světla. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Vypracování literární rešerše zaměřené na principy a uspořádání interferometrických systémů pro vizualizaci rozložení indexu lomu prostředí.
- 2) Návrh sestavy zvoleného systému s předpokládaným využitím dostupných optických komponent a 3D tisku, součástí bude detekce interferenčního obrazu digitálním obrazovým snímačem.
- 3) Praktická realizace a optimalizace systému včetně definice kritických parametrů a analýza jejich vlivu na kvalitu výsledného obrazu.
- 4) Demonstrace pomocí vizualizace definovaných akustických polí a proudění plynu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] PANIGRAHI, Pradipta Kumar; MURALIDHAR, Krishnamurthy. Schlieren and shadowgraph methods in heat and mass transfer. New York: Springer, 2012.

[2] MAZUMDAR, Amrita. Principles and techniques of schlieren imaging systems. 2013.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 24.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Skalský

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Táto bakalárska práca sa zameriava na riešenie vizualizácie akustických vln pomocou laserovej interferencie. V teoretickej časti sú zhrnuté potrebné teoretické znalosti pre pochopenie využitej metódy schlieren fotografie. Praktická časť popisuje realizáciu a výsledky zostavených sústav, zobrazuje rozdiely a rieši problémy, ktoré nastali pri testovaní. Okrem vizualizácie akustických vln umožňuje pozorovať aj tok plynov a vzduchu pri malých zmenách indexu lomu.

## **Klíčová slova**

schlieren, shadowagraph, vizualizácia toku, laser, digitálne spracovanie obrazu, ultrazvuková levitácia

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on solving the visualization of acoustic waves using laser interference. The necessary theoretical knowledge to understand the used method of schlieren photography are summarized in the theoretical part. The practical part describes the implementation and results of the assembled systems, shows the differences, and solves the problems that occurred during testing. Apart from visualization of acoustic waves, we can also observe the flow of gases and air with small changes of refractive index.

## **Keywords**

schlieren, shadowagraph, flow visualization, laser, digital image processing, ultrasonic levitation

## **Bibliografická citace**

RAFFAY, Tobiáš. *Vizualizace akustických polí pomocí laserové interference*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134752>.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Michal Skalský.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Tobiáš Raffay
<b>VUT ID studenta:</b>	211171
<b>Typ práce:</b>	Bakalářská práce
<b>Akademický rok:</b>	2020/21
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Vizualizace akustických polí pomocí laserové interference

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Skalskému, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc jako aj za ochotu a přátelský přístup a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 24. května 2021

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>9</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>1 TEORETICKÁ REŠERŠE.....</b>	<b>13</b>
1.1 OPTICKÉ JAVY .....	13
1.1.1 <i>Index lomu.....</i>	<i>13</i>
1.1.2 <i>Rozptyl .....</i>	<i>14</i>
1.1.3 <i>F-number .....</i>	<i>14</i>
1.2 SCHLIEREN METÓDA.....	15
1.2.1 <i>História .....</i>	<i>15</i>
1.2.2 <i>Možnosti konštrukcie .....</i>	<i>16</i>
1.3 POROVNANIE SHADOWGRAPH A SCHLIEREN METÓD.....	20
1.3.1 <i>Shadowgraph metóda.....</i>	<i>20</i>
1.3.2 <i>Rozdiely.....</i>	<i>21</i>
1.4 PRVKY SÚSTAVY A PROBLEMATIKA .....	23
1.4.1 <i>Laser .....</i>	<i>23</i>
1.4.2 <i>Šošovky.....</i>	<i>25</i>
1.4.3 <i>Nepriaznivé efekty pri využití šošoviek.....</i>	<i>28</i>
1.4.4 <i>Zrkadlá.....</i>	<i>30</i>
1.4.5 <i>Knife Edge.....</i>	<i>32</i>
<b>2 NÁVRH KONŠTRUKCIE A KOMPLETIZÁCIA SÚSTAVY .....</b>	<b>34</b>
2.1 NÁVRH KONŠTRUKCIE.....	34
2.1.1 <i>Držiak pre šošovky.....</i>	<i>34</i>
2.1.2 <i>Nastaviteľný podstavec .....</i>	<i>35</i>
2.1.3 <i>Úchytka pre kalibráciu.....</i>	<i>37</i>
2.1.4 <i>Držiak pre knife edge .....</i>	<i>38</i>
2.2 KONŠTRUKCIA SÚSTAV .....	40
2.2.1 <i>Základňa .....</i>	<i>40</i>
2.2.2 <i>Rozptyl laseru.....</i>	<i>41</i>
2.2.3 <i>Toeplerova sústava – šošovky.....</i>	<i>43</i>
2.2.4 <i>Systém s jedným zrkadlom.....</i>	<i>44</i>
2.2.5 <i>Sústava na zobrazenie akustických vln.....</i>	<i>45</i>
2.3 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY .....	47
2.3.1 <i>Vizualizácia Toepler metódou.....</i>	<i>47</i>
2.3.2 <i>Vizualizácia pomocou sústavy s jedným zrkadlom.....</i>	<i>48</i>
<b>3 ZÁVER.....</b>	<b>54</b>
<b>LITERATÚRA.....</b>	<b>55</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>58</b>

# ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Sústava Toepler systému [7].....	16
1.2	Schéma Z-type systému [7] .....	17
1.3	Sústava s využitím jedného parabolického zrkadla [8].....	17
1.4	Schéma Background-oriented schlieren systému [12].....	18
1.5	Schéma focusing (zaostrovacieho) schlieren systému [7].....	19
1.6	Schéma Toeplerovej jedno-šošovkej sústavy s využitím Fresnel šošovky .....	19
1.7	Najjednoduchšia forma shadowgraph systému [1] .....	20
1.8	Najjednoduchšia forma shadowgraph systému v praxi [27] .....	21
1.9	Rázové vlny pri projekte letiacom pri 1,5 násobku rýchlosti zvuku zachytené pomocou shadowgraph metódy [18].....	22
1.10	Porovnanie oboch metód pri detonácii [29].....	22
1.11	Vnútoraná konštrukcia HeNe laseru [20] .....	23
1.12	Základné typy šošoviek [23].....	25
1.13	Pozitívna (konvergujúca) šošovka a jej reakcia na kolimovaný lúč [23] .....	26
1.14	Negatívna (divergujúca šošovka) a jej reakcia na kolimovaný lúč [23] .....	26
1.15	Problematika kolimovaného lúča.....	27
1.16	Chromatická aberácia problematika a riešenie [24].....	28
1.17	Popis sférickej aberácie [25].....	29
1.18	Porovnanie zaostrenia odrazených lúčov z povrchu zrkadiel pri systéme s jedným zrkadlom [28] ..	30
1.19	Porovnanie zaostrenia odrazených lúčov z povrchu zrkadiel pri Z-typ systéme [28].....	31
1.20	Priblíženie problematiky zaostrenie odrazených lúčov pre oba systémy[28] .....	31
1.21	Efekt posunu knife edge[1].....	32
1.22	Rôzne možnosti nastavenia polohy knife edge [2].....	33
1.23	Farebný schlieren efekt horiacej loptičky [26].....	33
2.1	Čelný pohľad na návrh držiaka .....	34
2.2	3D Model držiaka .....	35
2.3	Návrh posuvného podstavca .....	36
2.4	3D Model posuvného podstavca .....	36
2.5	Návrh úchytky.....	37
2.6	3D model úchytky.....	37
2.7	Schéma pre držiak na knife edge .....	38
2.8	3D model knife edge držiaky .....	38
2.9	Finálna sústava, spolu s pohľadom na osadenie nastaviteľného podstavca .....	39
2.10	Hliníkový profil využívaný ako základňa sústav [30].....	40
2.11	Rozmery profilu [30] .....	40
2.12	Schéma sústavy pre zmenu kolimovaného lúča.....	41
2.13	Návrh držiaka pre rozptylné šošovky.....	41
2.14	Fyzické riešenie sústavy .....	42
2.15	Ladenie Toepler sústavy .....	43
2.16	Nastavenie beam-splittra.....	44
2.17	Schéma zapojenia pre systém s jedným zrkadlom .....	44
2.18	Realizovaná konštrukcia systému s jedným zrkadlom.....	45
2.19	Sústava pre vizualizáciu stojatej vlny .....	46
2.20	Tok a prúdenie butánu vo vzduchu pomocou Toepler sústavy .....	48
2.21	Tok a prúdenie butánu vo vzduchu zobrazený pomocou sústavy s jedným zrkadlom.....	48
2.22	Zmeny prúdenia vzduchu vyjadrené pohybom tmavších oblastí .....	49

2.23	Vizualizácia ľudského výdychu .....	49
2.24	Prúdenie teplého vzduchu nahor .....	50
2.25	Prúdenie studeného vzduchu uvoľňujúceho sa z kocky ľadu smerom nadol.....	50
2.26	Vizualizácia stojatej vlny .....	51
2.27	Levitácia polystyrénových guľôčiek .....	52
2.28	Vizualizácia uloženia guľôčok v zónach vysokého tlaku ultrazvukových vln.....	52
2.29	Priblíženie vizualizácie zoradenia guľôčok v bledých pásmach vysokého tlaku ultrazvukových vln.....	53

# ZOZNAM TABULIEK

Tabulka 1 Špecifikácia pre laser HeNe HRR015 [20] .....	24
---	----

# ÚVOD

Schlieren metóda zobrazovania je bežným nástrojom v dynamike tekutín. Pomocou tejto techniky sa znázorňujú razové vlny a tok vzduchu v aerodynamických štúdiách. Schopnosť vizualizovať tok vzduchu sa môže javiť prekvapujúco pre niekoho, kto o tejto metóde nepočul. Je to aj z dôvodu, že fyzikálne vlastnosti vzduchu sa často zanedbávajú. V každodennom živote naberať dojem, že vzduch je úplne transparentný a bez akýchkoľvek lomových efektov. Preto môže byť ťažké si predstaviť ako ľahký a priehľadný tok plynu možno zviditeľniť optickým prístrojom.

Materiály a javy, ktoré sú študované schlieren technikou majú veľmi slabé indexy lomu a teda nemajú skoro žiadne odrazy. Toto ich robí ťažko až nemožno pozorovateľné okom a o to sú prekvapujúcejšie, keď ich vidíte prvýkrát.

Cieľom tejto práce je zoznámiť sa s optickou teóriou využívanou pri schlieren zobrazovaní, opísať základné princípy schlieren zobrazovacej techniky, navrhnúť a zostrojiť funkčnú optickú sústavu na sledovanie týchto javov.

Prvá časť tejto bakalárskej práce je teoretická rešerše v oblasti schlieren zobrazovacej techniky. Samostatný úvod do schlieren techniky ako aj popis využívaných optických prvkov. Zároveň opísaná problematika, ktorá môže nastať a navrhnuté riešenia. Porovnanie schlieren a shadowgraph metódy a zároveň jednotlivých konštrukcií schlieren sústav.

Druhá časť je návrh 3D modelov súčiastok v programe SolidWorks využitých pri konštrukcii sústav. Dosiahnuté výsledky oboch spracovaných sústav, riešenia nedostatkov a porovnanie týchto metód ako aj využitých optických prvkov je taktiež opísané v tejto časti.

V rámci bakalárskej práce je teda opísaná schlieren metóda, jej využitie v praxi, vytvorené sústavy a výsledky dosiahnuté pri týchto meraniach ako aj riešenia vyskytnutých problémov.

V závere bakalárskej práce je zhodnotenie a zhrnutie dosiahnutých výsledkov.

# 1 TEORETICKÁ REŠERŠE

V tejto kapitole sú najprv opísané optické javy dôležité pre pochopenie schlieren metódy. Druhý odstavec popisuje históriu, rozdelenie a popis schlieren sústavy. Ako ďalšie je porovnanie schlieren metódy s shadowgraph metódou. Posledná sekcia opisuje využívané prvky v sústave, možnú problematiku a zároveň aj riešenia.

## 1.1 Optické javy

Táto časť poskytuje stručný prehľad o fyzikálnych javoch a konštantách, ktoré ovplyvňujú metódu schlieren fotografie. V zásade to funguje na kombinácii lomu a difrakcii, ktoré odchyľujú šírené svetlo. Presné rozlíšenie lomu a difrakcie nie je úplne jasné. V literatúre sú pojmy niekedy dokonca protichodné. Odchýlky sú spôsobené priestorovou zmenou indexu lomu skúmaného média.

### 1.1.1 Index lomu

Index lomu je bezrozmerná fyzikálna veličina opisujúca ako rýchlo svetlo prechádza cez materiál. Označujeme ho  $n$  a vzorec výpočtu je uvedený nižšie

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

kde  $c = 299\,792\,458$  m/s to je rýchlosť svetla vo vákuu a  $v$  je fázová rýchlosť svetla v danom médiu. Zvyšujúci index lomu zodpovedá zníženej rýchlosti svetla v materiáli. Teória lomu je nevyhnutná pre pochopenie schlieren systémov. Je to základný fyzikálny jav, ktorý zviditeľňuje a zachytáva schlieren efekt.

U väčšiny materiálov sa index lomu mení s vlnovou dĺžkou o niekoľko percent vo viditeľnom spektre. Môže sa tiež použiť pri zvuku, avšak v takom prípade sa namiesto rýchlosti svetla využije rýchlosť zvuku a musí sa zvoliť iné referenčné médium ako vákuum. Užitočnosť indexu lomu v meraniach je tá, že v transparentných médiách je to jedinečný údaj na získanie hustoty materiálu. Keďže hustota závisí od teploty a koncentrácie prvkov, nehomogenity v poli indexu lomu prenášajú informácie súvisiace s procesmi prenosu tepla a hmoty. [1]

Existujú tri hlavné javy, ktoré menia index lomu objektu:

1. Tlakové gradienty napríklad v ultrazvuku. Vo vzduchu sú to malé zmeny indexu lomu. Iba rázové vlny sú dostatočne silné na to, aby boli viditeľné ľudským okom.
2. Teplotné rozdiely, tieto vytvárajú najväčšie variácie lomu a sú najjednoduchšie na vizualizáciu. Ako príklad môže byť uvedený plameň sviečky, ktorý patril medzi prvé objekty štúdie pomocou schlieren techniky.
3. Zmeny na základe chemického zloženia, tok plynov vo vzduchu, keďže ich index lomu sa môže výrazne líšiť od indexu lomu vzduchu [2].

### 1.1.2 Rozptyl

Rozptyl je termín používaný vo fyzike na opísanie širokej škály fyzikálnych procesov, pri ktorých sú pohybujúce sa častice ako aj žiarenie, napríklad svetlo alebo zvuk, nútených odchyliť sa od priamej dráhy nerovnomernosťami v médiu, cez ktoré prechádzajú [3].

Keď dopadá lúč svetla na časticu, rozptýlená energia ukáže zmeny vzhľadom na intenzitu, vlnovú dĺžku, fázu, polarizáciu a iné vlastnosti vlny [1].

Lasery vytvárajú kolimované lúče o malých priemeroch, čo pri realizácii nie je výhodné, svetlo zo zdroja preto musíme rozptýliť a znovu dostať kolimácie. Viac sa problematikou rozptylu zaoberám v kapitole 0.

### 1.1.3 F-number

V optike f-number alebo inak clonové číslo optického prvku označuje pomer ohniskovej vzdialenosti  $f$  a priemeru šošovky alebo zrkadla  $D$ .

$$K = \frac{f}{D} \quad (1.2)$$

Clonové číslo je prevrátená hodnota relatívnej clony, priemer clony vydelený ohniskovou vzdialenosťou.

Je zvykom zapisovať clonové číslo ako  $f/$ , čo značí matematické vyjadrenie priemeru optického prvku v zlomku  $f/K$ . Ako príklad uvediem, že ak by ohnisková vzdialenosť optického prvku bola 100 mm a priemer bol 50 mm, f-number by bolo 2, čo by znamenalo zápis  $f/K$  teda  $f/2$ .

Pre schlieren metódu pomocou šošoviek je vhodné využiť šošovky najmenej s hodnotou clonového čísla práve  $f/2$ . Pri zrkadlách dokonca  $f/4$ , avšak tie sa vyrábajú vo väčšej kvalite, takže je jednoduchšie zohnať kvalitnejšie zrkadlo s veľkým priemerom ako šošovku.

Práve f-number využitého optického prvku rozhoduje o možnostiach a kvalite zobrazovania celého systému. Čím väčšie f-number, tým je možné zobrazit' menšie zmeny indexu lomu.

## 1.2 Schlieren metóda

Je to optická metóda na vizualizáciu tepla, zvuku alebo rozdielov tlaku vo vzduchu. Vďaka schlieren systému sme schopný zreteľne vidieť rušivé zmeny v prietoku na základe minimálnych rozdielov indexu lomu vo vzduchu. Táto technika môže byť až natoľko citlivá, aby bolo možné pozorovať tlakové teplo stúpajúce z ľudskej ruky pri izbovej teplote. Na ukážku princípu fungovania sa ďalej prezentujú javy ako plameň horiacej sviečky, kde je možné pozorovať teplo v okolí, zvuk z reproduktora, sledovanie zvukových vln a reakcia na prekážky, dýchanie človeka, je možné poukázať na vplyv nosenia rúška pri dýchaní[4,5,6].

### 1.2.1 História

Schlieren a shadowgraph boli formálne vynájdené Robertom Hookom v 17. storočí, teda dosť pred ich dobou využívania. Pri ich znovuobjavení bol nemecký fyzik August Toepler v 1864 pri štúdiu nadzvukového pohybu, doteraz sa používa v leteckom inžinierstve na sledovanie prúdenia vzduchu okolo objektov [7].

Vizualizácia pomocou fotografií nebola dostatočne uspôsobená rýchlosti schlieren zobrazovania počas Toeplerovej éry. Takže si svoje pozorovania zakresľoval ručne. Z jeho rozsiahlych štúdií sa zachovali ručne maľované kresby plameň sviečky a vizualizácia sférických rázových vln. Jeho počiatočné pokusy vidieť zvuk pomocou schlieren metódy zlyhali, ale po pár nezdaroch sa mu podarilo pomocou elektrických iskier generovať ostré akustické rušenia. Nazval ich zvukovými vlnami, čo však nebola úplne pravda, boli to rázové vlny cestujúce rýchlejšie ako zvuk.

Toepler videl a ilustroval pohyb, odraz a lom rázových vln ako prvý, čím rozbehol nové pole štúdií, ktoré je dodnes kľúčovým prvkom fyziky a techniky. Šokové a rázové vlny boli jednou z najdôležitejších a zároveň najpopulárnejších javov na štúdium od objavenia schlieren fotografie. Dalo by sa povedať, že schlieren a rázové vlny spolu vyrástli [1].

Avšak na začiatku 20. storočia prieskum v tejto oblasti stagnoval a to predovšetkým z dôvodu náročnosti výstavby schlieren systému dostatočne veľkého pre štúdium každodenne využívaných predmetov. Tento problém sa vyriešil s nástupom výkonnejších digitálnych kamier a vyššieho výpočtového výkonu. Taktiež dostupnosťou potrebných prvkov na zostrojenie systému. Spolu tieto optické metódy na vizualizáciu neviditeľných javov mali veľký vplyv pri testovaní v aerodynamických tuneloch a vývoji vysokorýchlostných lietadiel v polovici 20. storočia [1,2,7].

Zároveň boli vyvinuté nové metodiky na štúdium refrakčných médií založených na tejto technike. Dnes je ich použitie veľmi rozšírené naprieč vedeckými experimentmi. To má za následok využívanie schlieren zobrazovacích systémov v oblasti počítačového videnia, biológie, fyziky a environmentálneho inžinierstva.

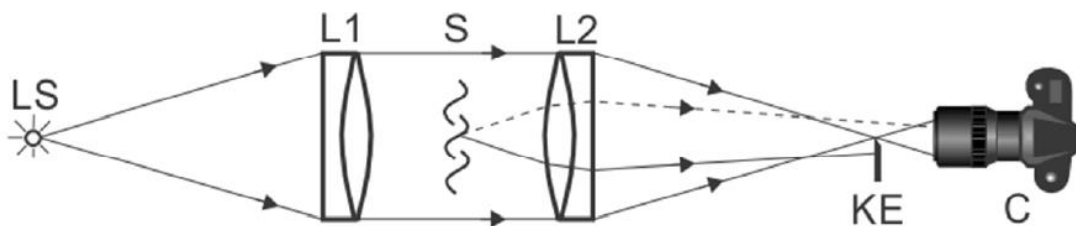
### 1.2.2 Možnosti konštrukcie

V tejto časti sú popísané možnosti konštrukcie schlieren systému, ich rozličnosti vo funkcionalite a porovnávanie plusy a mínusy. Všetky konštrukcie trpia pri vibráciách.

Schlieren metóda závisí na presných šošovkách alebo parabolických zrkadlách a na zariadení, ktoré sníma zmeny poruchy lomu v priehľadných médiách. Najčastejšie sa využíva týchto päť metód: Toeplerov systém, Z-type systém, systém s jedným zrkadlom, BOS – background-oriented schlieren systém a Focusing schlieren systém. Ako lacnejšia alternatíva pre študentské využitie je možná konštrukcia pomocou Fresnelovej šošovky.

#### Toeplerov systém

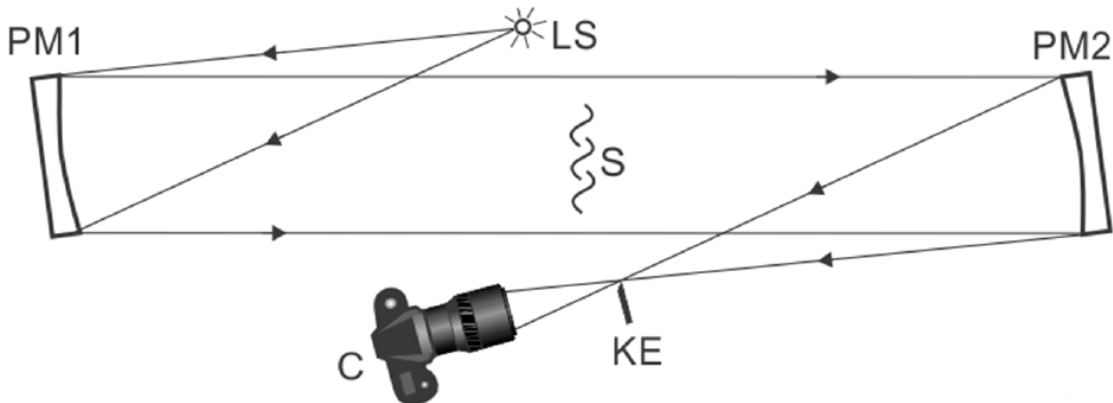
Je to klasická schlieren zostava, bola vyvinutá pri začiatkoch skúmania schlieren fotografie a pomenovaná je po Augustovi Toeplerovi. Svetlo s malým priemerom zo zdroja (LS-Light source) je zrazené šošovkou (L1-Lens1) prechádzajúce do šošovky (L2), ktorou je zaostrené. Do ohniska je vložená ostrá hrana (KE-Knife edge), ktorá by mala blokovať ideálne 50% svetla. Za ňou je umiestnená snímajúca kamera (C). Zmeny v lome žiarenia vo vzduchu, spôsobené skúmaným materiálom (S). Prerušovaná čiara v tomto diagrame opisuje lúč vyhýbajúci sa ostriu noža a smeruje do kamery. Plná čiara poukazuje na lúč lomený nadol a blokovaný hranou noža. Ak to zovšeobecníme tak na každý lúč vo svetelnom zväzku, máme nástroj, ktorý zachytáva fázové zmeny S a zobrazuje ich ako obraz v tieňovej stupnici. To je podstata schlieren systémov [7]. Plusy oproti ostatným zapojeniam netrpia na zdvojenie obrazu, malé priestorové požiadavky, jednoduchosť nastavenia oproti parabolickým zrkadlám. Mínusy sú menšia presnosť oproti systémom s parabolickými zrkadlami.



Obrázok 1.1 Sústava Toepler systému [7]

## Z-type systém

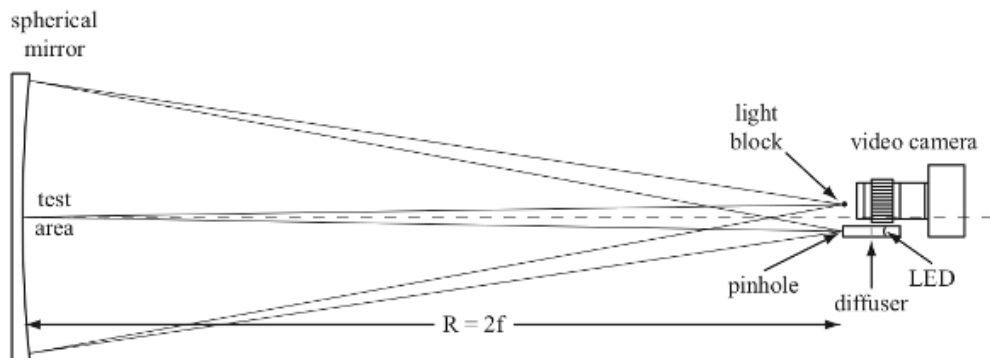
Princíp funkcie Z-type systému je rovnaký ako u Toepler zapojenia. Avšak priemer šošoviek určuje zorné pole sústavy. Ak by mal byť priemer väčší ako 15 cm, tak sa šošovky nahradia parabolickými zrkadlami využívanými v teleskopoch L1 a L2 z Toepler zapojenia je nahradené PM1 a PM2 (PM-Parabolic mirror). Pri tomto systéme je treba dbať na správne nastavenie uhlov zrkadiel spolu so sledovaním zdroju svetla, aby sme sa vyhli (Ghost images) zdvojeniu obrazu. Dokážeme získať presnejší obraz ako u Toepler metódy [7].



Obrázok 1.2 Schéma Z-type systému [7]

## Systém s jedným zrkadlom

Oproti predošlým zapojeniam má viacero výhod ako napríklad menší počet súčiastok, jednoduchosť nastavenia a najvyššiu presnosť pri správnom nastavení. Avšak mínusy sú tu tiež a to, že potrebuje veľa priestoru, keďže celý systém je v jednom smere a potrebujeme splniť podmienku, že zdroj svetla musí byť vo vzdialenosti dvojnásobok ohniskovej vzdialenosti. Ďalší mínus je zdvojenie obrazu, ktoré je časté pri tomto systéme. avšak môžeme ho minimalizovať, ak priložíme zdroj svetla čo najbližšie ku kamere [7].



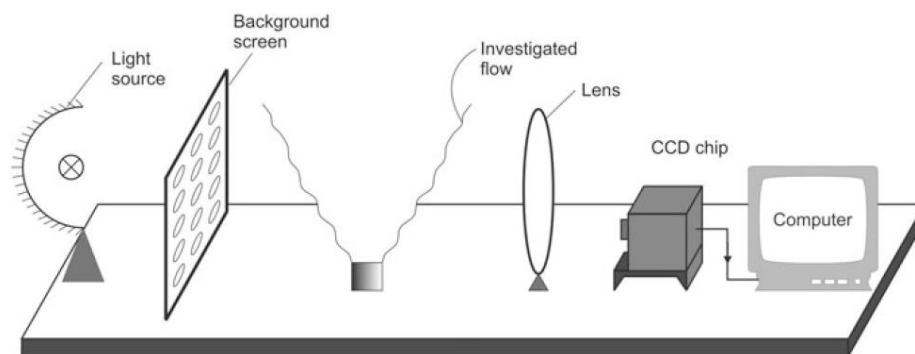
Obrázok 1.3 Sústava s využitím jedného parabolického zrkadla [8]

### **BOS-Background-oriented schlieren**

Je označovaný ako aj syntetický schlieren systém. Je zároveň aj najmladším, prvá zmienka je z roku 2000. Taktiež na jeho zostrojenie stačí iba jeden optický komponent ako u vyššie spomenutého.

Tento systém deteguje odchýlky indexu lomu porovnávaním neskresleného obrazu pozadia s obrazom pozadia, ktoré bolo ovplyvnené skúmaným žiarením objektu vloženého medzi optický komponent a pozadie. Funguje to tak, že najprv počítač zaznamená obraz pozadia v pokoji ako referenčný obraz. V druhom kroku sa urobí záznam pozadia prekrytého skúmaným tokom [9].

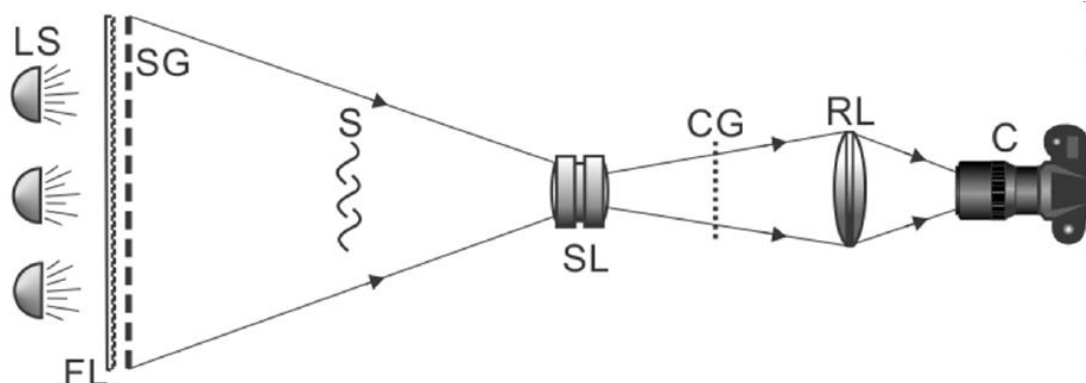
Existujú vyhodnocovacie algoritmy pre koreláciu snímok ako aj analýzou jednotlivých pixelov a zistenie nasnímaných rozdielov. Pretože BOS je závislý len na veľkosti a detaile použitého pozadia, výhodou je virtuálne takmer nekonečné zorné pole. Táto technika sa stala použiteľnou až keď počítačová technika dosiahla dostatočnú rýchlosť spracovania dát. A teraz sa využíva na štúdium turbulentných tokov, zvukových vln a nadzvukových stíhačiek [10,11].



Obrázok 1.4 Schéma Background-oriented schlieren systému [12]

### **Focusing schlieren systém**

Tento systém je najzložitejší na vyhotovenie, zdroj svetla je ovplyvnený mriežkou (SG – Source Grid), ktorá je podsvietená viacerými menšími lampami (LS), ktorých svetlo dopadá na Fresnelovu šošovku (FL). A tá ich smeruje do Schlieren šošoviek (SL), čím sa myslí napríklad kamerový objektív (veľký, drahý, presný, využívaný v štúdiovej fotografii). Tento objektív vytvára zmenšený obraz snímky zdrojovej mriežky (SG), ktorú následne blokuje (CG – Cutoff Grid) tá nahrádza (KE) z predošlých systémov. Takto zablokovaný obraz smeruje do prevodovej šošovky (RL – Relay Lens), ktorá zrazí lúče do kamery [7].

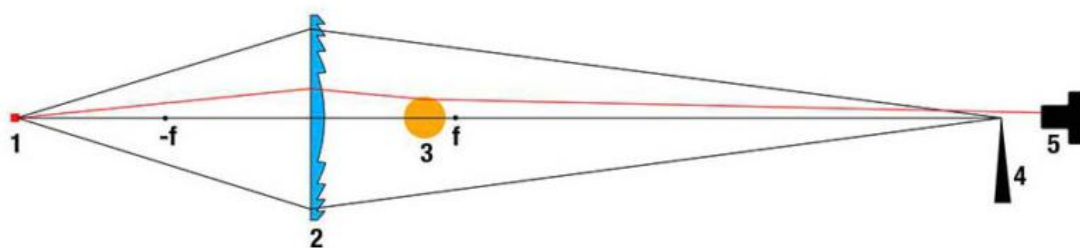


Obrázok 1.5 Schéma focusing (zaostrovacieho) schlieren systému [7]

### Systém s Fresnelovou šošovkou

Táto sústava využíva design a princíp Toeplerovej jedno-šošovkovej sústavy, ktorej jediná zmena je v tom, že ako optický prvok využíva plastovú Fresnelovu šošovku. Tieto šošovky sa nachádzajú v spätných projektoroch, v minulosti nebol až taký dôraz na kvalitu týchto šošoviek. Avšak v posledných rokoch sa Fresnelova optika mnohonásobne zlepšila a preto, boli pokusy o využitie v schlieren systémoch. Skutočný záujem o Fresnelovu šošovku je ten, že má veľkú svetlú clonu, to znamená, že v jej oblasti je možné sledovať a testovať pomerne veľké objekty. Vysoko kvalitné šošovky s priemerom 250 mm a viac sú extrémne drahé. Pre schlieren metódu je potrebné využiť šošovky s f-number aspoň  $f/4$  alebo  $f/8$ . Doposiaľ boli Fresnelove šošovky z tohto dôvodu nevyhovujúce, to sa zmenilo, keďže terajší výrobcovia ponúkajú  $f/4$  šošovky.

Je to vhodná sústava pre úvod do schlieren techniky, nie je finančne náročná, avšak to sa odzrkadľuje na kvalite. Je vhodná na zobrazovanie zmien indexov lomu pri plynch a teple.



Obrázok 1.6 Schéma Toeplerovej jedno-šošovkovej sústavy s využitím Fresnel šošovky

## 1.3 Porovnanie Shadowgraph a Schlieren metód

Po celom svete sa na zobrazovanie a meranie javov v transparentných médiách používajú techniky schlieren a shadowgraph. Digitálna revolúcia mala transformačný účinok a nahradila neohrabané metódy fotografického filmu s vynikajúcimi - aj keď nákladnými vysokorýchlostnými kamerami, ktoré robia z digitálnej korelácie a spracovania shadowgraph a schlieren obrazov rutinu, a vytvorenie úplne nového syntetického schlieren BOS.

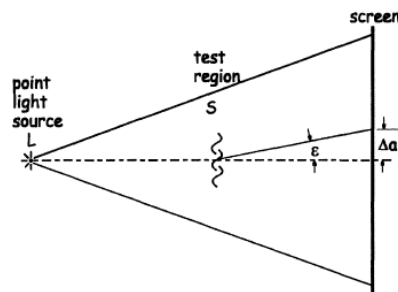
Naše oči a bežné fotoaparáty nemajú spôsob, ako rozlíšiť fázové rozdiely vo svetelnom lúči. Vidíme iba amplitúdu, farebný kontrast a (s príslušnými slnečnými okuliarmi) polarizáciu. Keby sme dokázali vidieť fázy/vlny, otvorili by sa nám nové možnosti. To je to, čo metódy schlieren a shadowgraph robia: prekladajú fázové rozdiely do amplitúd a niekedy aj farebné rozdiely, tak aby boli pre nás viditeľné [1].

### 1.3.1 Shadowgraph metóda

Shadowgraph technika je najjednoduchšia cesta pre vizualizáciu rozptýleného svetla, práve toto rozptýlené svetlo umožňuje zobrazit' viditeľný obraz tieňu tekutiny.

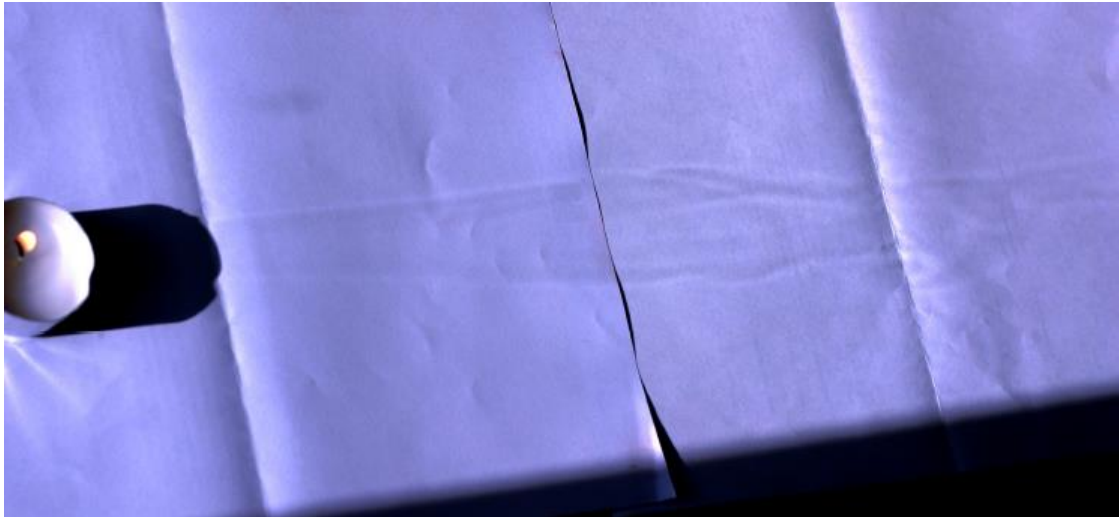
Pre pochopenie shadowgraph zobrazovania, je potrebné pamätať na to, že svetlo z bodového zdroja je vo forme lúčov, ktoré sa neohýbajú ani nekrižujú, pokiaľ nie sú narušené [13]. Teda, že svetlo z tohto zdroja je kolimované.

Je to jednoduchá metóda, dokonca tak, že stačí iba svetelný zdroj (L), pozorovaný objekt (S) a primerane veľká plocha, na ktorú je vrhaný tieň.



Obrázok 1.7 Najjednoduchšia forma shadowgraph systému [1]

Bez pozorovaného objektu S v zornom poli, svetelný zdroj osvetľuje plochu rovnomerne. Ale s prítomným S sú niektoré lúče lomené, ohnuté alebo odklonené z ich pôvodných ciest. Jeden takýto lúč je možné vidieť na vyššie uvedenom obrázku 1.7. Pri prechode cez objekt S utrpel lom pod uhlom  $\varepsilon$  a dorazí na iné miesto na ploche určené vzdialenosťou  $\Delta a$ . Teraz prispieva k extra osvetleniu nového bodu, zatiaľ čo predošlá pozícia, kde dopadal, trpí deficitom osvetlenia. Zovšeobecníme to na celý objekt, vieme povedať, že jeho optické nehomogenity prerozdeľujú osvetlenie na celej ploche. Spôsobuje to ohýbanie predtým pravidelných lúčov a ich križovanie, čím sa mení vrhajúci tieň [14].



Obrázok 1.8 Najjednoduchšia forma shadowgraph systému v praxi [27]

Shadowgraph vizualizácia dosiahnutá pomocou slnečného svetla je viditeľná na obrázku 1.8. Tento jav zobrazenia prúdenia horúceho vzduchu z ohňa alebo sviečky je každodenný jav premietaný na slnkom zaliatu plochu, ktorý vám môže byť známy. Rovnaký výsledok možno získať použitím jedného bodového zdroja svetla z namiesto slnka ako popisuje obrázok 1.7. Oba zdroje produkujú približne kolimované svetlo. Keďže shadowgraph technika nie je dokonale presná, avšak je to dostačujúce pre zobrazenie tohto javu.

### 1.3.2 Rozdiely

Schlieren a shadowgraph metódy spolu úzko súvisia, existuje však niekoľko rozdielov. Obraz tvorený shadowgraph systémom nie je zaostrený optický obraz, je to iba tieň. Schlieren obraz je optický obraz tvorený optickým prvkom a teda, nesie konjugovaný optický vzťah k pozorovanému objektu. Ako ďalšie, schlieren metóda vyžaduje „knife-edge“, čo blokuje určitú časť lámaného svetla, v shadowgraph metóde sa toto nepoužíva, pretože to nie je na tom založený výsledný efekt [14].

Napokon úroveň osvetlenia v schlieren obraze reaguje na prvú priestorovú deriváciu indexu lomu :

$$\frac{\partial n}{\partial x} \quad (1.3)$$

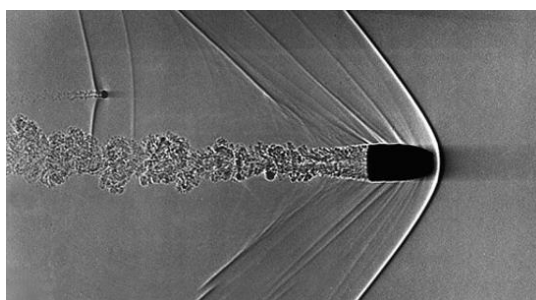
V shadowgrape sú rozdiely osvetlenia úmerné druhej priestorovej derivácii (Laplaciánu) indexu lomu :

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (1.4)$$

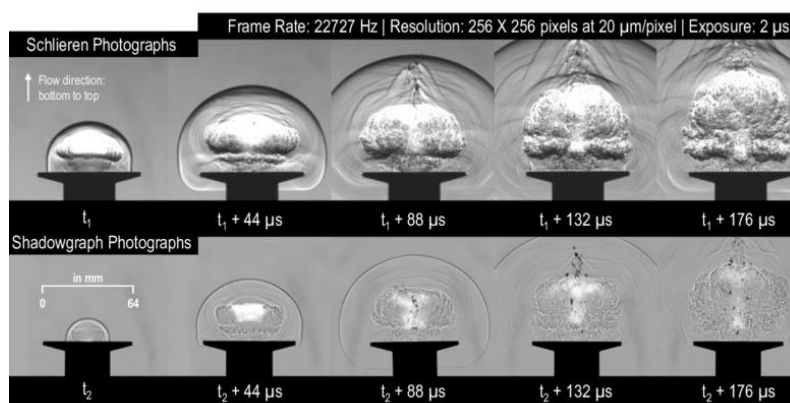
Ďalší rozdiel je medzi potrebnou aparatórou na zostrojenie a zložitosťou. Veľkou výhodou shadowgraph metódy je jednoduchosť. Tento efekt sa môže vyskytovať aj v prirodzených podmienkach bez akejkoľvek špičkovej technológie. Schlieren efekt najlepšie vynikne v laboratóriu pomocou žiaroviek, zrkadiel a šošoviek [14].

Výhodou metódy shadowgraph je to, že umožňuje rozsiahle vizualizácie a zobrazuje hlavné črty objektu bez veľkých zmien v osvetlení. Aj keď je táto metóda vo všeobecnosti menej citlivá ako schlieren, za určitých okolností môže byť vhodnejšia. Napríklad,  $\partial^2 n / \partial x^2$  môže byť oveľa väčšia  $\partial n / \partial x$  v prietoku plynu zahrňujúceho rázové vlny alebo turbulencie, ktoré sa vyskytujú okolo nadzvukových rýchlostí ako napríklad projektily. Shadowgraph vykresľuje na základe tejto dvojitej derivácie obrázky turbulentných tokov v mierke. Rázové vlny vytvárajú silnejšie derivácie indexu lomu a to spôsobuje že vynikajú ako ostré čiary v shadowgrape, obrázok 1.9.

Celkovo pri slabších rušeniach má vyššia citlivosť schlieren metódy výhodu. Je jednoznačné, že mierka 1 : 1 so študovaným objektom je často rozhodujúcim prínosom. Zvýrazňuje doslova až preháňa detaily pozorovaného objektu, kde shadowgraph zase tieto detaily stráca. Vo veľa oblastiach využitia je vyššia citlivosť a prispôsobivosť schlieren metódy prvoradá [15,16,17].



Obrázok 1.9 Rázové vlny pri projekte letiacom pri 1,5 násobku rýchlosti zvuku zachytené pomocou shadowgraph metódy [18]



Obrázok 1.10 Porovnanie oboch metód pri detonácii [29]

## 1.4 Prvky sústavy a problematika

Na základe dostupných prostriedkov som overoval dve najrozsiahlejšie metódy a to, Toeplerovu metódu alebo sústav s jedným parabolickým zrkadlom. V tejto kapitole sú opísané konštrukčné rozdiely medzi týmito metódami. Popis ich prvkov, problémy a možné vylepšenia. Avšak kvôli využitiu lasera ako svetelného zdroju sú potrebné urobiť určité zmeny od klasickej schémy konštrukcie.

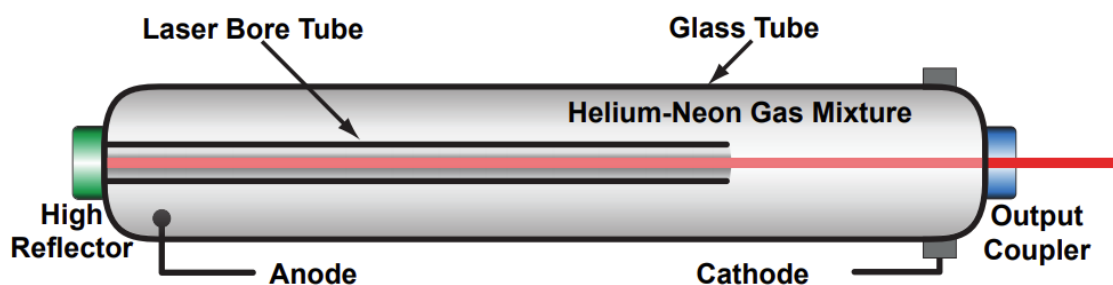
### 1.4.1 Laser

Pretože študované javy majú naďalej tendenciu rásť k vyšším teplotám a rýchlostiam, je pravdepodobné, že lasery budú hrať čoraz dôležitejšiu úlohu v schlieren zobrazovaní. Ich mimoriadne vysoký monochromatický jas umožňuje zmraziť veľmi rýchle javy, ako sú detonačné vlny, v expozičnom čase rádovo  $10^{-9}$ s pomocou Kerr bunkových clôn<sup>1</sup> a pomocou vhodných filtrov. To umožňuje rozšírenie využitia optických metód merania na podobné javy[19].

V druhej polovici 20. storočia sa ako svetelné zdroje pre schlieren a shadowgraph metódy využívali aj žiarovky, xenónové trubice alebo oblúkové žiarovky. Teraz sa ako zdroje svetla využívajú najmä LED a lasery.

#### HRR015 - HeNe Laser

Hélium-neónový laser, ktorý sa zvyčajne nazýva HeNe laser, je malý plynový laser s mnohými priemyselnými a vedeckými využitiami. Primárna vlnová dĺžka, pri ktorej sa používa je 632,8 nm, rovnajúca sa červenej farbe viditeľného spektra. Výkon HeNe laserov býva v rozmedzí 0,5–75 mW. Získané médium v laseri je zmes hélia a neónu v pomeroch 5:1 a 20:1 a táto zmes je uzavretá v sklenenej trubici pri nízkom tlaku. Prierez konštrukciou lasera je vidieť nižšie [12,20].



Obrázok 1.11 Vnútna konštrukcia HeNe lasera [20]

Proces v HeNe laseri štartuje zrážkou elektrónov z elektrického výboja s atómami hélia v plyne. Táto zrážka dodá héliu excitáciu (zvýši mu energiu) zo základného stavu na dlhodobometastabilný excitovaný stav.

<sup>1</sup> (Kerr cell shutters - typ fotografickej clony používanej pre veľmi vysoké rýchlosti uzávierky na úrovni nanosekúnd)

Zdroj excitácie pre tieto lasery je vysokonapäťový elektrický výboj medzi anódou a katódou, ktoré sa nachádzajú na protiľahlých koncoch sklenej trubice. Následne sa začnú zrážať nabudené atómy hélia s neónovými atómami v základnom stave, čo vedie na prenos energie na elektróny neónov.

Počet atómov neónu vstupujúcich do stavu so zvýšenou energiou sa zvyšuje, kým nenastane inverzia v počte excitovaných atómov neónu a neónov v základnom stave. Z týchto stavov sa elektróny rýchlo rozpadajú naspäť na základný stav. Výsledkom spontánnej a stimulovanej emisie medzi týmito stavmi je emisia svetla rovnajúca sa vlnovej dĺžke 632,82 nm. Celý proces je zosilnený odrazovými stenami dutiny. Optická dutina lasera pozostáva z plochého vysoko-odrazového zrkadla na jednom konci laserovej trubice a výstupného spojovacieho zrkadla s prenosom približne 1% na druhom konci. Výkon HeNe lasera je obmedzený, pretože horná úroveň neónu sa nasýti vyšším prúdom, zatiaľ čo dolná úroveň sa lineárne mení s prúdom[20].

Výstup nepolarizovaného HeNe lasera pozostáva z rýchlo sa meniaceho, lineárne polarizovaného lúča, ktorého polarizačná orientácia sa mení v časovej škále nanosekúnd. Nepolarizované lasery sú ideálne pre aplikácie, kde v dráhe lúča nie sú žiadne polarizačné prvky. Výstup je taktiež monochromatický, intenzívny, orientovaný, kolimovaný [12,20].

Tabulka 1 Špecifikácia pre laser HeNe HRR015 [20]

Common Specifications	
<b>Wavelength</b>	633 nm
<b>Beam Drift<sup>3</sup></b>	<0.2 mrad
<b>Long Term Beam Drift</b>	<0.05 mrad
<b>Series Resistors in Housing</b>	94 K $\Omega$
<b>Operating Current</b>	5.25 mA
<b>Shock</b>	15 g for 11 msec
<b>Weight</b>	600 g
<b>CDRH/CE Classification</b>	IIIa/3R (HRR005 is IIa/2)

Item #	HRR015
<b>Min Output Power</b>	1.5 mW
<b>Maximum Output Power</b>	2.0 mW
<b>Polarization</b>	Random
<b>Mode Structure</b>	TEM00 > 99%
<b>Beam Diameter</b>	0.57 mm
<b>Beam Divergence</b>	1.41 mrad
<b>Longitudinal Mode Spacing</b>	1082 MHz
<b>Noise (30 Hz – 10 MHz)</b>	<5% rms
<b>Starting Voltage</b>	<10 kV (DC)
<b>Operating Voltage (DC)</b>	1500 V

### 1.4.2 Šošovky

Aj keď Toepler pôvodne využíval šošovky z refrakčných ďalekohľadov ako hlavné prvky jeho schlieren sústavy, zrkadlovo založené systémy sú taktiež používané vďaka využitiu Foucaultovho knife-edge testu. Tento test sa používa na presné meranie tvaru povrchu konkávných zakrivených zrkadiel. Princíp je v sledovaní osvetlenia po celej ploche zrkadla. Ak však pred zrkadlo pridáme skúmaný objekt, máme jednoduchý schlieren systém [21].

Hneď na začiatku existujú určité rozdiely medzi týmito systémami. Pri sústavách so šošovkami môžu byť prvky uložené za sebou v jednej osi, toto tak úplne neplatí pri zrkadlových sústavách, ktoré sú buď mimo osi o pár stupňov pri využití jedného parabolického zrkadla alebo sa používa sústava s dvomi zrkadlami v Z-type systéme. Avšak toto nie je problém pri bežnom skúmaní, ale pri využití viacerých zrkadiel môžu nastať komplikácie s nastavením správnych uhlov a zároveň zložitejšia manipulácia [22].

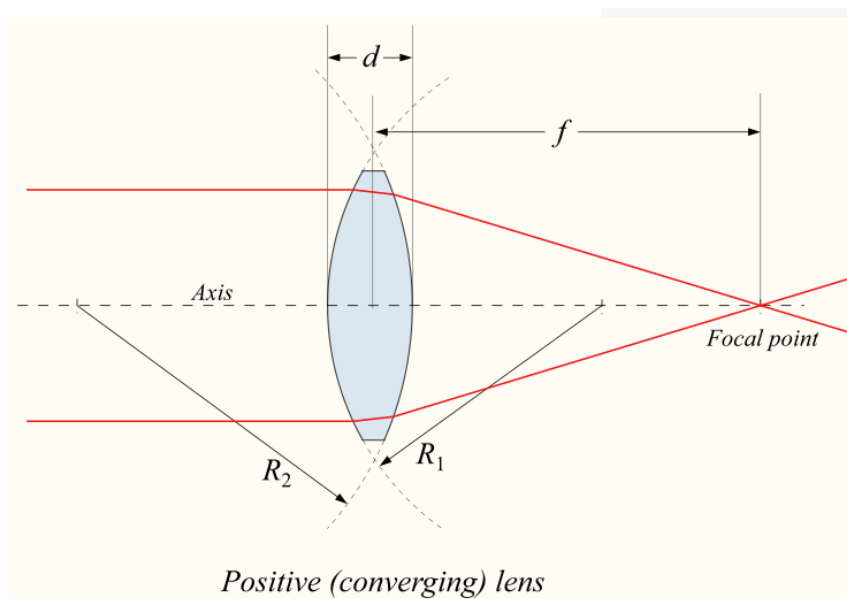
Šošovka je optický prvok, ktorý zaostruje alebo rozptyľuje svetelný lúč pomocou lomu. Jednoduchá šošovka je zložená z jedného kusu priehľadného materiálu, zatiaľ čo zložené sú väčšinou ako viacero jednoduchých šošoviek usporiadaných pozdĺž spoločnej osi. Sú vyrábané z materiálov, ako je sklo alebo plast a sú brúsené, leštené alebo tvarované do požadovaných tvarov. Tieto tvary závisia podľa zakrivenia oboch povrchov strán šošovky [23].

Ak sú oba povrchy konvexné (vypuklé) šošovka je bikonvexná. Ak sú dokonca oba povrchy rovnakého polomeru zakrivenia tak hovoríme o equikonvexnej šošovke. Pri oboch konkávných (vydutých) povrchoch máme bikonkávnu. Ak je jeden z povrchov rovný, šošovka je plocho-konvexná alebo plocho-konkávna v závislosti od zakrivenia druhého povrchu. Existujú aj šošovky nazývané meniskus, majú tvar misky a môžu byť buď pozitívne alebo negatívne, v závislosti od relatívneho zakrivenia oboch povrchov. Negatívny meniskus má strmší konkávný povrch a je tenší v strede ako na periférii. Naopak, šošovka pozitívneho menisku má strmší konvexný povrch a je hrubšia v strede ako na periférii [23].



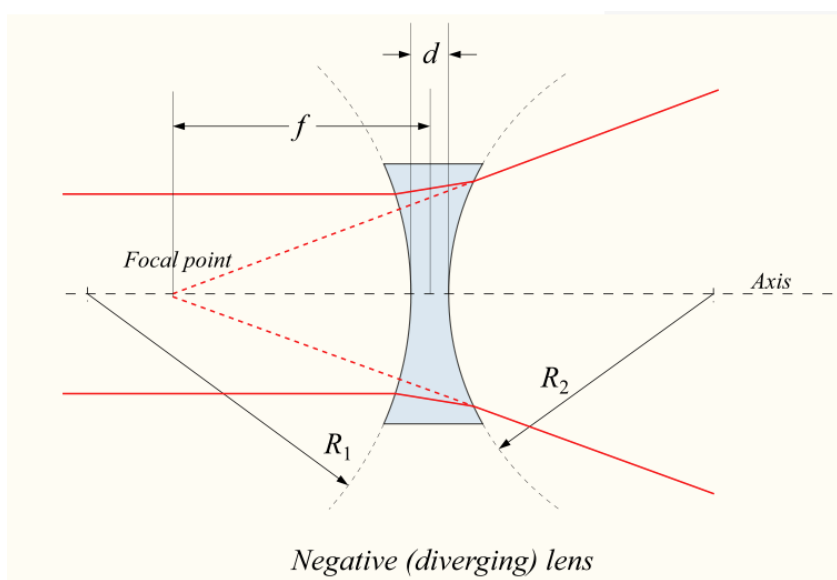
Obrázok 1.12 Základné typy šošoviek [23]

Ak je šošovka bikonvexná alebo plocho-konvexná, kolimovaný lúč svetla prechádzajúci šošovkou konverguje do bodu zaostrenia za šošovkou. V tomto prípade sa šošovka nazýva pozitívna alebo konvergujúca.



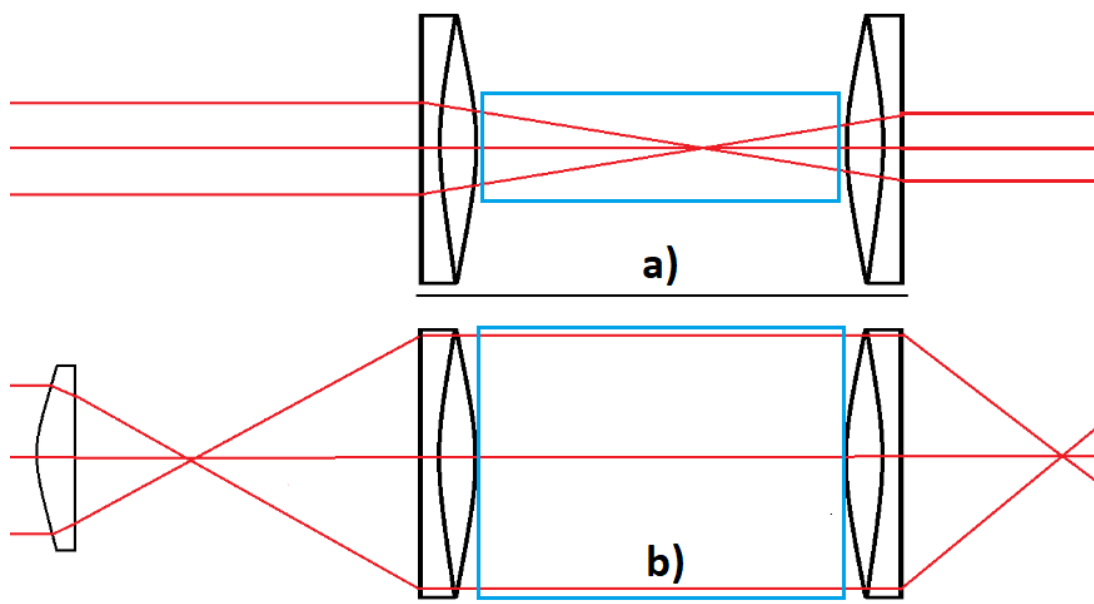
Obrázok 1.13 Pozitívna (konvergujúca) šošovka a jej reakcia na kolimovaný lúč [23]

Ak je šošovka bikonkávna alebo plošne-konkávna, kolimovaný lúč svetla prechádzajúci šošovkou sa rozchádza (rozptyľuje); šošovka sa tak nazýva negatívna alebo rozchádzajúca.



Obrázok 1.14 Negatívna (divergujúca šošovka) a jej reakcia na kolimovaný lúč [23]

Pri využití zdroja svetla s nekolimovaným lúčom by stačilo pracovať iba s konvexnými šošovkami. Keďže laser, ktorý využívam pri tejto práci má kolimovaný lúč svetla to znamená, že má paralelné lúče, a preto by sa rozširoval minimálne. Tento efekt by spôsobil, že lúče zo zdroja svetla by neprechádzali celým priestorom, v ktorom by bolo možné skúmať schlieren jav 1.15 a. Preto ak chcem využiť celý priestor medzi šošovkami musím pridať do tejto sústavy ďalšiu šošovku, ktorá spôsobí rozptyl lúčov. Je možné využiť konkávnu (rozptylku), ale aj plocho-konkávnu, ktorá lúče najprv zaostrí do jedného bodu (ohniskovej vzdialenosti tejto šošovky), ale ďalej sa tieto lúče budú rozchádzať až kým nenarazia na ďalšie optické prvky 1.15 b. Využitie konkávnej šošovky je skôr vhodné pre Toepler sústavu a plocho-konkávna šošovka je vyhovujúca pre obe sústavy [1,2,12].



Obrázok 1.15 Problematika kolimovaného lúča

- a) Vyššie spomenutý problém kolimovaného lúča
- b) Riešenie pomocou plocho konkávnej šošovky.

### 1.4.3 Nepriaznivé efekty pri využití šošoviek

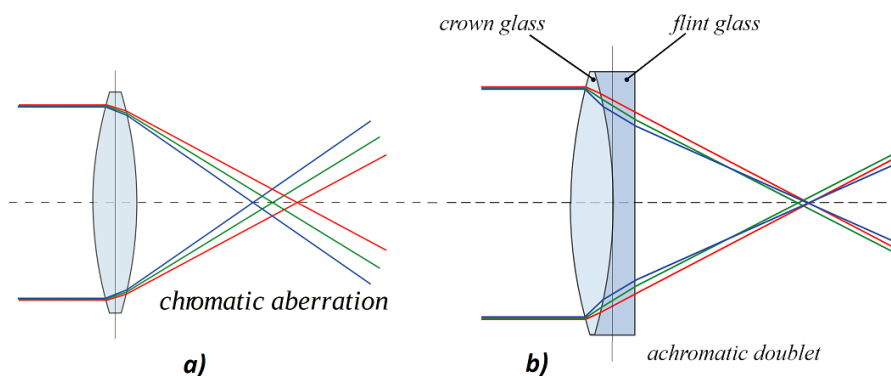
V optike existuje **chromatická aberácia** taktiež nazývaná chromatické skreslenie, je to zlyhanie šošovky spojiť všetky farby na rovnaký bod. Je to spôsobené disperziou : index lomu prvkov šošovky sa mení s vlnovou dĺžkou svetla. Zároveň index lomu väčšiny transparentných materiálov klesá so zvyšujúcou sa vlnovou dĺžkou. Pretože ohnisková vzdialenosť šošovky závisí od indexu lomu, táto zmena indexu lomu ovplyvňuje zaostrenie. V realite je zvyšková chromatická aberácia problémom aj pre drahé achromatické šošovky, kvôli čiastočnému obmedzeniu spektra ostrím noža. Toto spôsobuje farebné anomálie v schlieren obraze, ktoré sa javia ako obraz rozdelený na časti v spektrálne opačných farbách. Úzkopásmový farebný filter pri zdroji svetla eliminuje tento problém. Tento problém nenastáva pri zrkadlách, čo je veľkou výhodou [21,22].

Ohnisková vzdialenosť je definovaná zakrivením oboch povrchov a indexom lomu materiálu, z ktorého je šošovka vyrobená. Vzorec pre výpočet ohniskovej vzdialenosti šošovky  $f$  vo vzduchu :

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{nR_1R_2} \right], \quad (1.5)$$

Kde  $n$  je index lomu materiálu šošovky,  $R_1$  je polomer zakrivenia povrchu šošovky bližšie k zdroju svetla,  $R_2$  je polomer zakrivenia povrchu šošovky ďalej od zdroju svetla,  $d$  je hrúbka šošovky.

Riešenie je možné pomocou achromatickej šošovky. Tá je navrhnutá tak, aby obmedzovala účinky chromatickej a sférickej aberácie. Achromatické šošovky sú korigované tak, aby zaostrovali dve vlnové dĺžky (zvyčajne červenú a modrú) na rovnakú rovinu. Najbežnejším typom achromátu je achromatický doublet, ktorý sa skladá z dvoch samostatných šošoviek vyrobených s rôznou disperziou. Prvky šošovky sú namontované vedľa seba, často spolu spojené a tvarované tak, aby chromatická aberácia jednej z nich bola vyvážená druhou.

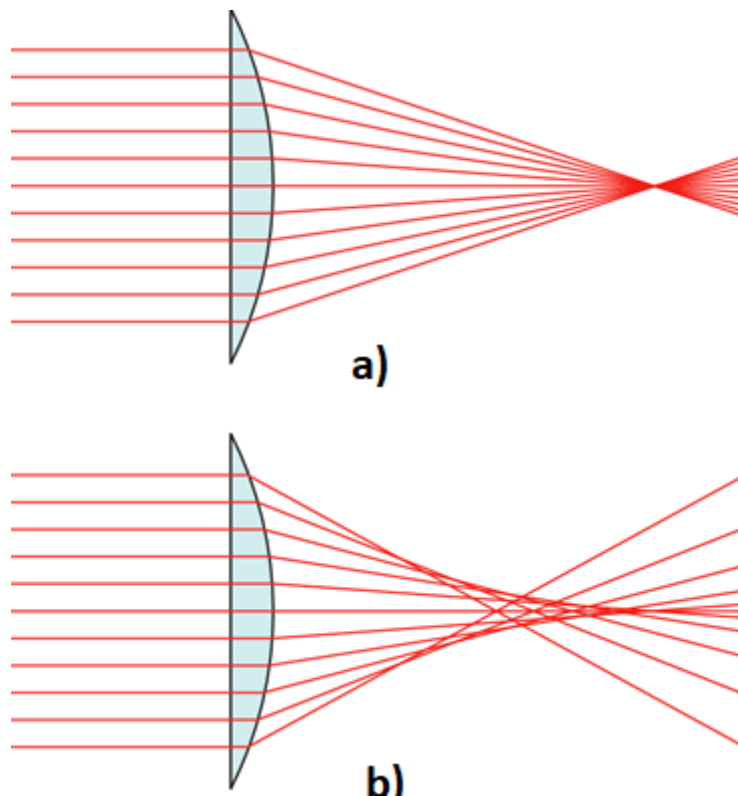


Obrázok 1.16 Chromatická aberácia problematika a riešenie [24]

a) Chromatickej aberácia pri konvexnej šošovke

b) Korekcia tohto efektu achromátovou sústavou

**Sférická aberácia** je typ skreslenia zisteného v optických systémoch, ktoré používajú prvky so sférickými povrchmi. Šošovky aj zakrivené zrkadlá sú zväčša vyrábané so sférickými povrchmi. Tento tvar je ľahšie tvarovateľný a aj cenovo menej náročný ako nesféricky zakrivený povrch. Svetelné lúče, ktoré dopadajú na sférický povrch mimo stred, sa lámu alebo odrážajú viac alebo menej ako lúče dopadajúce blízko stred. Táto odchýlka znižuje kvalitu obrazu vytváraného optickými systémami[25].



Obrázok 1.17 Popis sférickej aberácie [25]

a) Je zobrazená dokonalá šošovka bez sférickej aberácie - všetky prichádzajúce lúče sú zaoštré v ohniskovom bode.

b) Skutočnú šošovku so sférickým povrchom, ktorý na princípe sférickej aberácie vytvára efekt, že rôzne lúče sa nestretávajú v jednom ohnisku

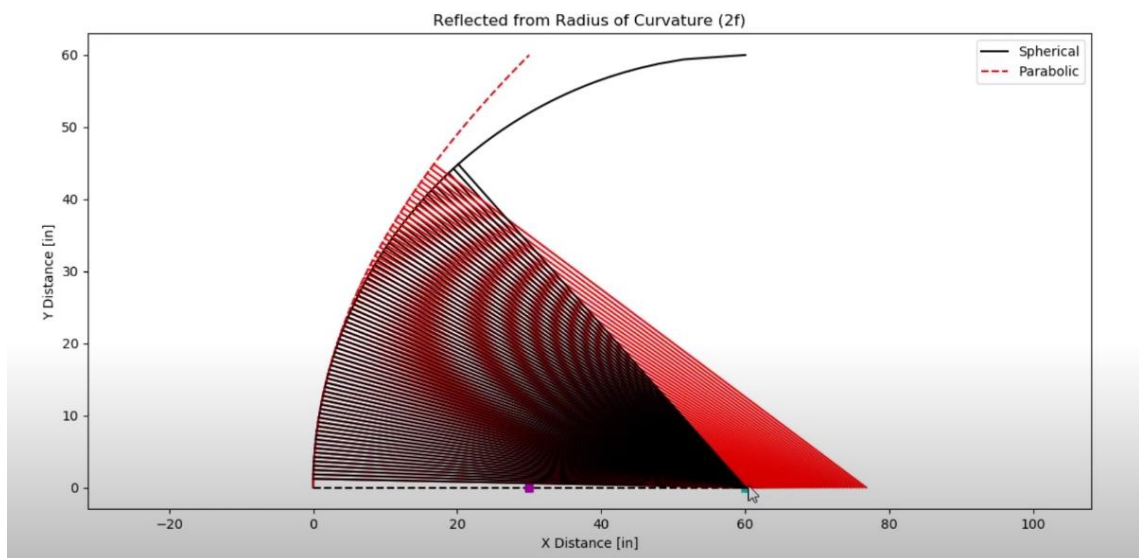
Moderné viacprvkové šošovky vyžadujú vysokú vnútornú kvalitu a niekoľko dokonale leštených povrchov k ideálnej kvalite. Zatiaľ čo zrkadlám k rovnako dosiahnuteľnej kvalite stačí jeden leštený povrch a malá vnútorná kvalita. Tieto faktory vravia v prospech zrkadiel. Čo sa týka nákladov a zorného poľa, najväčšie šošovky vhodné pre schlieren systém majú rozmedzie priemerov 200 mm. Väčšina sústav na skúmanie väčších prvkov alebo javov je zrkadlových[2,12].

Pre túto prácu bude vhodné otestovať, aký systém bude vhodnejší na základe dostupných optických prvkov.

#### 1.4.4 Zrkadlá

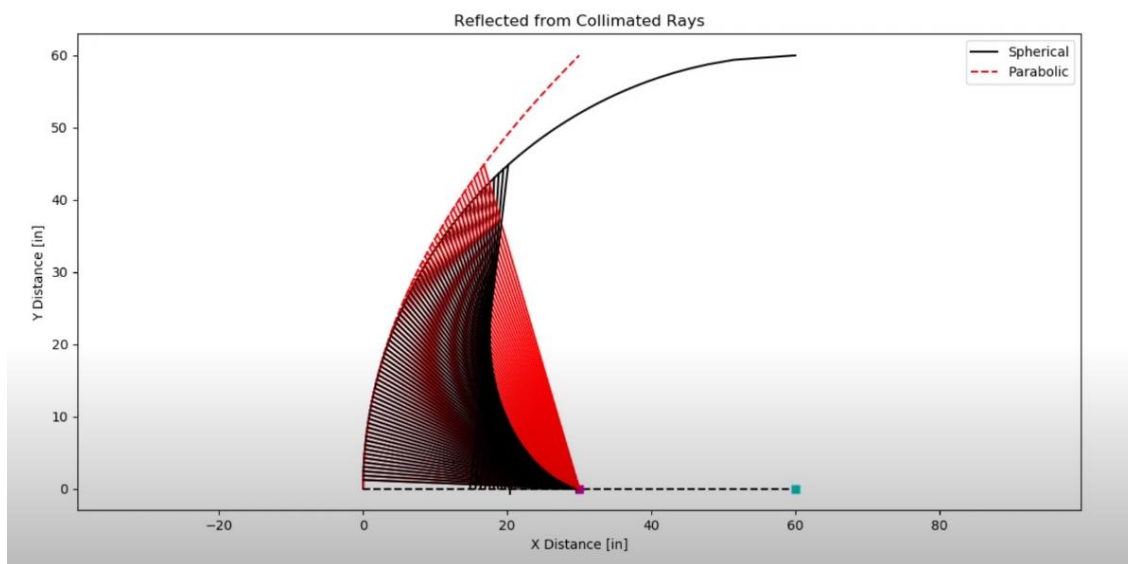
Pomocou zrkadiel môžeme zostaviť najčastejšie dve sústavy schlieren metódy a to Z-type pomocou dvoch zrkadiel alebo systém s jedným zrkadlom. Pre najlepšie výsledky by mal byť pre každý systém využitý iný druh zrkadiel. U Z-type sústavy je to pár konkávných parabolických zrkadiel a pri využití jedného zrkadla najlepšie výsledky dosiahneme práve konkávnym sférickým zrkadlom. Pre upresnenie sférické zrkadlo má guľovitý tvar z výrezu gule. Na rozdiel od parabolického, ktorého tvar je súčasťou kruhového paraboloidu, to znamená povrchu generovaného parabolou otáčajúcou okolo jej osi.

Pri systéme s jedným zrkadlom by mal byť zdroj svetla vzdialený od zrkadla vo vzdialenosti  $2f$  (kde  $f$  je ohnisková vzdialenosť), čo je tiež polomer zakrivenia pre sférické zrkadlo. Lúče svetla teda vychádzajú z bodu  $2f$  a dopadajú na povrchy zrkadiel rovnako. Avšak rozdiel nastáva pri odrazených lúčoch vracajúcich sa späť. Lúče odrazené od sférického zrkadla sa v tomto prípade vracajú presne do bodu  $2f$ , parabolické zrkadlo tento efekt nedosahuje v tejto sústave, odrazené lúče sa vracajú v osi  $x$ , avšak v rozličných bodoch, obrázok 1.20 a). Tento jav je viditeľný najmä pri zrkadlách s veľkým priemerom, ak sa dostaneme ku zrkadlám ľahšie dostupným pre väčšinu ľudí, teda v priemeroch 150 mm a menej, tak vracajúce sa odrazené lúče majú takmer identický bod  $2f$ , avšak lúče z parabolického zrkadla sú jemne vychýlené. To umožňuje využiť parabolické zrkadlo a získať dobrý obraz aj keď to nie je optimálne zrkadlo pre tento systém.



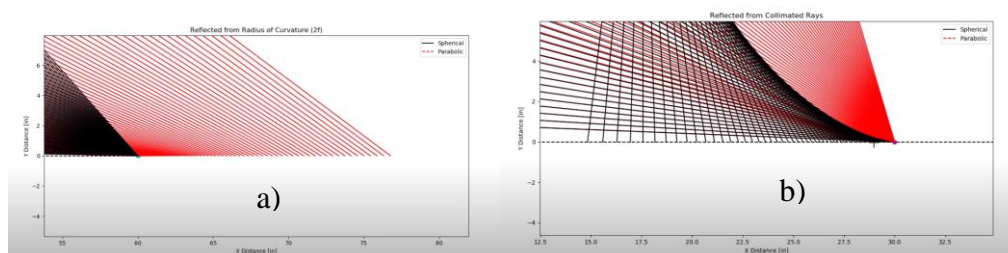
Obrázok 1.18 Porovnanie zaostrenia odrazených lúčov z povrchu zrkadiel pri systéme s jedným zrkadlom [28]

Z-typ systém využíva prvé zrkadlo na kolimovanie svetelného zdroja na druhé zrkadlo, ktoré ho potom zaostruje do ohniska. Pri parabolických zrkadlách nastane efekt, že všetky sa vracajúce odrazené lúče sa stretnú v ohnisku zrkadla. Avšak pri sférickom zrkadle je jav, že čím viac sa vzdľujeme od stredu zrkadla, tým bližšie sa k jeho povrchu zaostrujú tieto lúče. Z tohto vieme usúdiť, že parabolické zrkadlá sú vhodné pre obe zrkadlá v tomto systéme.



Obrázok 1.19 Porovnanie zaostrenia odrazených lúčov z povrchu zrkadiel pri Z-typ systéme [28]

Na obrázku vyššie 1.19 sú viditeľné simulované odrazené lúče oboch zrkadiel. Pre červené lúče parabolického zrkadla platí, že akokoľvek sú vzdialené na optickej osi y, sú zaostrené do jedného ohniska zrkadla. Lúče odrazené od sférického zrkadla nereagujú rovnako. Čím ďalej postupujú lúče od stredu zrkadla, tým bližšie sa práve k ploche zrkadla zaostrujú do viacerých ohnisk, obrázok 1.20 b).



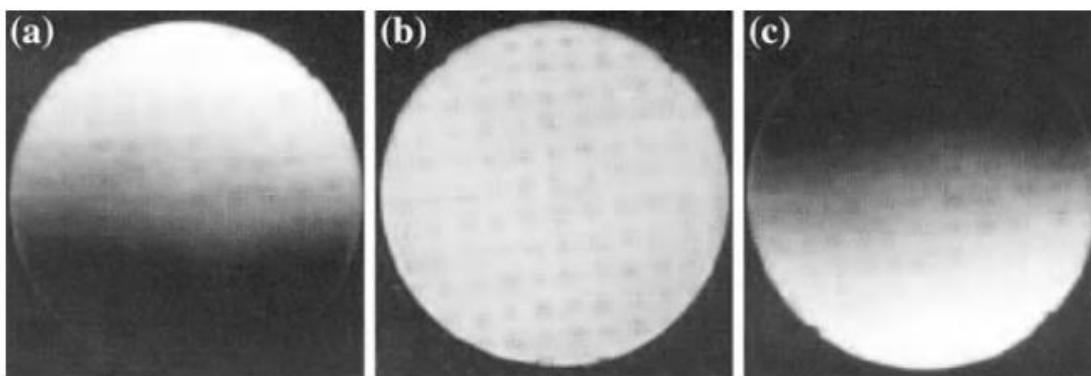
Obrázok 1.20 Priblíženie problematiky zaostrenie odrazených lúčov pre oba systémy[28]

Tak isto ako pri prvom systéme aj tu sa tento efekt zjemňuje pri menších priemeroch zrkadiel. To znamená, že pre oba systémy môžeme využiť oba typy zrkadiel, avšak ak to prostriedky umožňujú, pre čo najlepší efekt je potrebné využiť práve vhodné zrkadlo pre daný systém.

### 1.4.5 Knife Edge

Okrem rozdielov existuje jedna vec, ktorá je úplne rovnaká pre nastavenie zrkadlových alebo šošovkových sústav. Pretože optické javy sú v zásade rovnaké, filtrovanie svetla funguje rovnako na oboch systémoch. Používanie jednoduchých žiletiek ako filtrov je veľmi rozšírené. Ostrosť je potrebná, aby sa zabránilo ďalšej difrakcii na okraj. Toto filtrovanie je vlastne proces, ktorý vytvára schlieren efekt pomocou tieňov na obrazovke.

Okrem problémov, ako je kolimácia, zaostrenie a rovnomerná intenzita svetla hrá nastavenie ostria noža významnú úlohu v kvalite zaznamenaného schlieren obrazu. S najlepším usporiadaním by nerušený svetelný lúč mal na okraji ostria noža vytvoriť bod svetla, ktorý sa zhoduje s priemerom lúča pred prechodom optickými prvkami. Ako je hrana noža posúvaná a blokuje tento svetelný lúč, intenzita osvetlenia rovnomerne klesá po celom obraze. Obrázok nižšie 1.21 opisuje príklady rozloženia intenzity svetla zobrazené pre rôzne polohy ostria noža 1.21 a) a 1.21 c) sú viditeľné nerovnomerné rozloženia intenzity svetla. Keď je hrana noža buď pred alebo za ohniskom zaostrenia. Prostredný obrázok 1.21 b) zobrazuje správne umiestnenie priamo v bode zaostrenia [1,12].

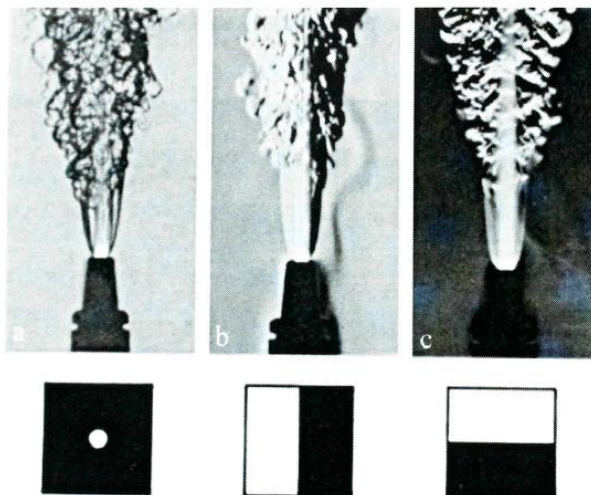


Obrázok 1.21 Efekt posunu knífe edgu[1]

- a) Hrana ostria noža je veľmi blízko pri druhej šošovke.
- b) Správne nastavenie blokovaného lúča
- c) Hrana ostria noža je už za ohniskovou rovinou druhej šošovke.

Ďalším dôležitým krokom pri usporiadaní je nastavenie percentuálneho limitu svetla, ktoré blokujeme ostrým nožom aby sa získala požadovaná citlivosť. Ak je blokovaná malá časť svetelného lúča, veľké množstvo svetla vedie ku zlému kontrastu schlieren obrazu. Pri zablokovaní väčšej časti lúča, obrázky s vysokým kontrastom sú viditeľné, ale takéto meranie môže viesť ku strate informácií v miestach s nízkym gradientom hustoty [12].

Zvyčajne sa ostrie noža nastavuje do vodorovnej (horizontálnej polohy). Hrana filtruje kolmo rozptýlené lúče, pretože sú zamerané práve na hranu. Zmena orientácie nie je vylúčená, niekedy dokonca užitočná, všetko závisí od požiadavku na sledovaný jav. Na obrázku 1.22 sú znázornené rozdiely v sústavách s rozličným nastavením filtrom.



Obrázok 1.22 Rôzne možnosti nastavenia polohy knife edge [2]

- a) Výmena hrany za dierku
- b) Vertikálne nastavenie hrany
- c) Horizontálne možnosť konfigurácie

Schlieren systémy trpia na vibrácie, dokonca aj na tak malé, ktoré spôsobuje pohyb laboratórneho personálu v okolí. Ak citlivosť schlieren systému znižíme, či už menším percentom filtrovaného svetla alebo výmenou ostria noža za graded filter, tak sa nahradzuje sa na miesto, kde bol predtým knife-edge. Je to zovšeobecnenie ostria noža, cut-off filter s dvoma odtieňmi [2,12].

Je možné rozšírenie tohto systému ďalej tým, že filter šedej stupnice sa nahradí farebným filtrom, a tým sa vytvorí viacfarebný schlieren obraz merania. Je potrebné nahradiť laser zdrojom bieleho svetla napr. bielou LEDkou. Ak sa použije farebný filter, musia byť optické prvky achromatické. Inak by problémom mohla byť chromatická aberácia. Tento systém sa označuje ako dúhový alebo farebný schlieren.



Obrázok 1.23 Farebný schlieren efekt horiacej loptičky [26]

## 2 NÁVRH KONŠTRUKCIE A KOMPLETIZÁCIA SÚSTAVY

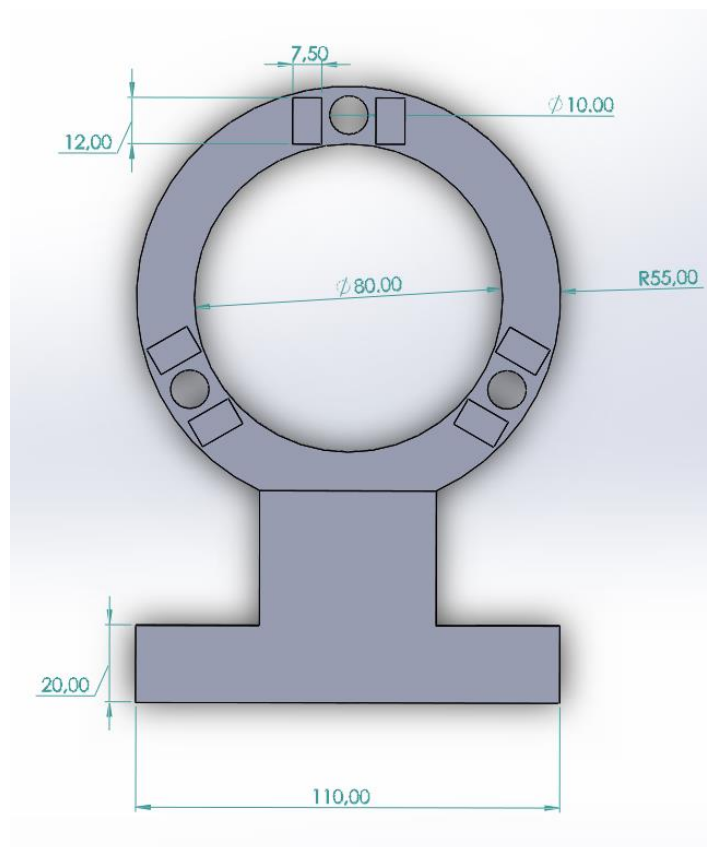
### 2.1 Návrh konštrukcie

V tejto kapitole je zhrnutý návrh potrebných 3D modelov pre optické prvky v programe SolidWorks.

#### 2.1.1 Držiak pre šošovky

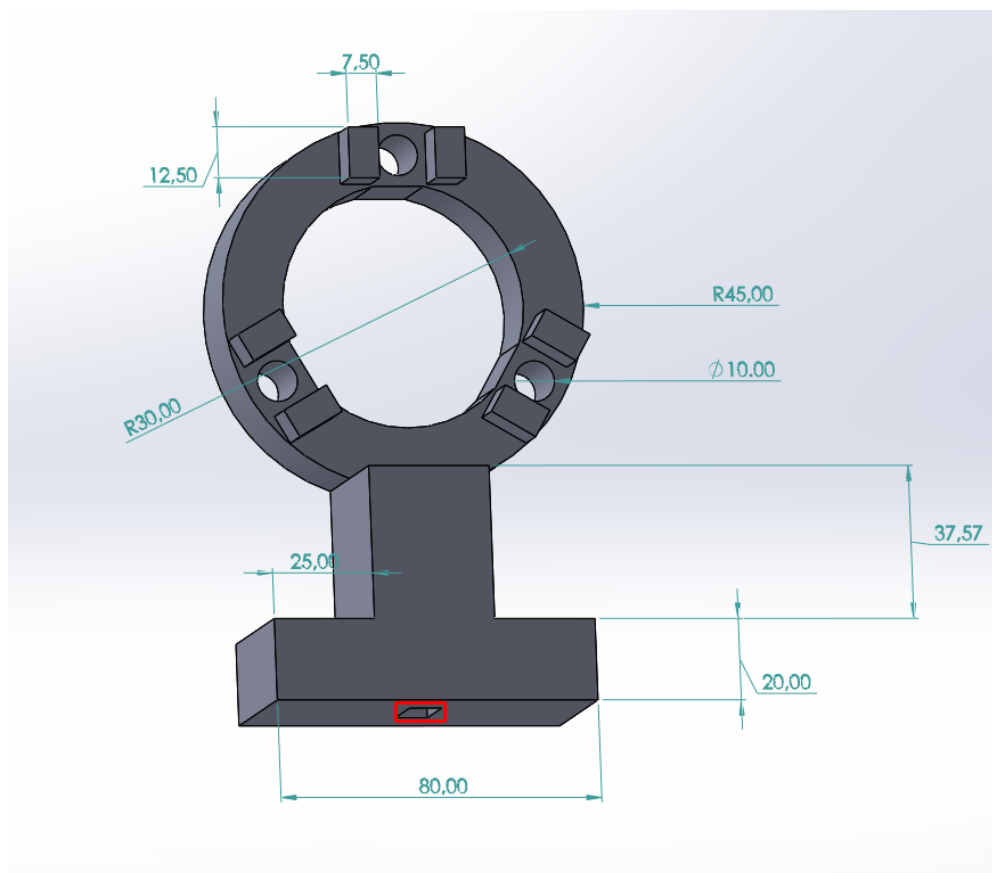
Najdôležitejší navrhovaný model bol pre uchytenie a možné doladovanie šošovky. Pre samotný systém je dôležitá správna kalibrácia osi šošoviek, a preto bolo potrebné premyslieť konštrukciu, aby bola ľahko manipulovateľná a zároveň vyhovujúca požiadavkám na stabilitu.

Keďže k dispozícii sú šošovky o priemere 65 mm, tak vnútorný priemer som navrhol 80 mm pre možné doladenie.



Obrázok 2.1 Čelný pohľad na návrh držiaka

Po 3D modelovaní má podstava šírku 40 mm. Kruh, v ktorom budú zasadené šošovky, je vysunutý o 20 mm a obdĺžnikové opierky pre nastaviteľný úchop sú vysunuté o ďalších 10 mm z povrchu kruhu.

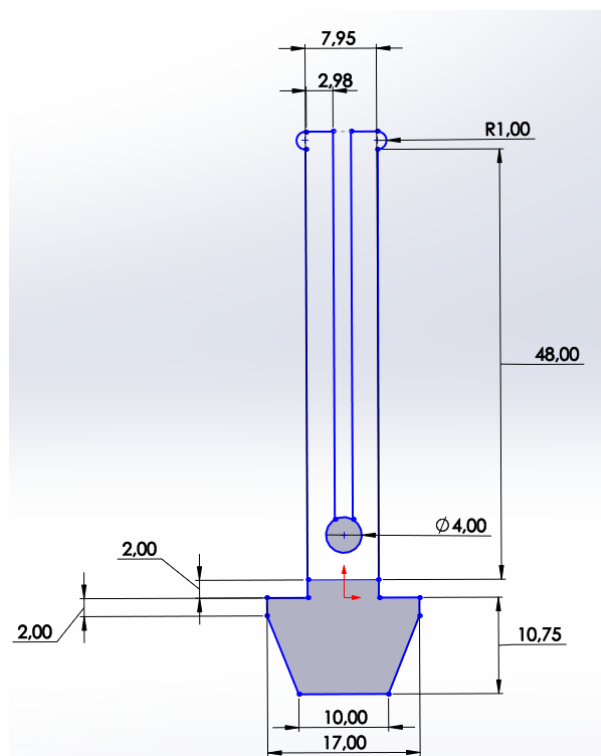


Obrázok 2.2 3D Model držiaka

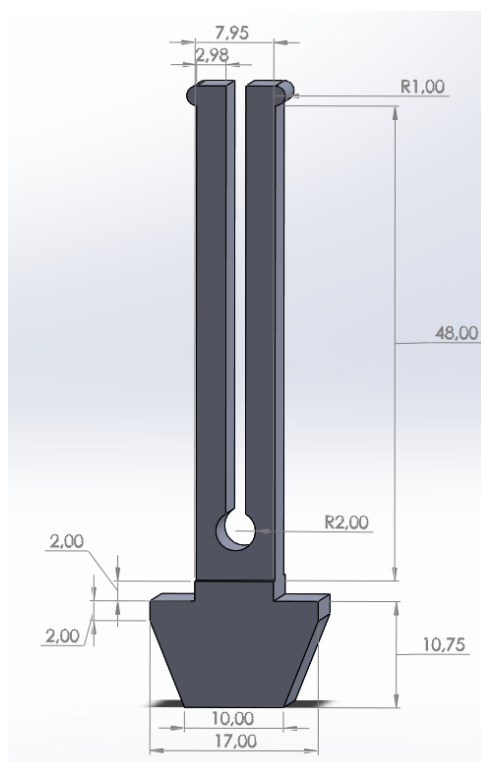
### 2.1.2 Nastaviteľný podstavec

Ako hlavná opora pre celý systém je obdĺžnikový valcovaný hliníkový profil s drážkami. Takže bolo potrebné navrhnuť uchytenie a najlepší nápad bol priamo navrhnuť stojan s možnosťou posuvu na y osi. Preto bolo potrebné do základne stojana vytvoriť diery o rozmeroch 8x15 mm ako je vidieť na obrázku 2.2 v červenom rámečku.

Princíp by mal byť, že spodná podstava sa zasunie do drážky na profile a vrchná časť by mala byť ohybná vďaka výrezu medzi dvoma stĺpmi s oválnou koncovkou, ktorá sa po zasunutí do diery zaprie do stien a udrží sa vďaka treniu. Kalibrácia bude možná na rozmedzí od 0 – 40 mm na osi z. Šírka držiaka je 15 mm.



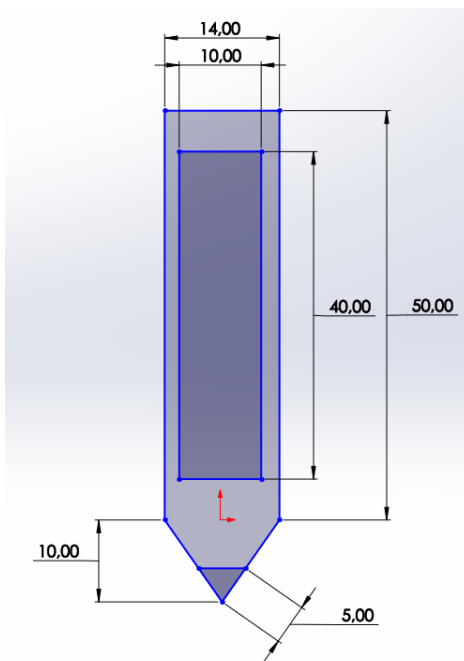
Obrázok 2.3 Návrh posuvného podstavca



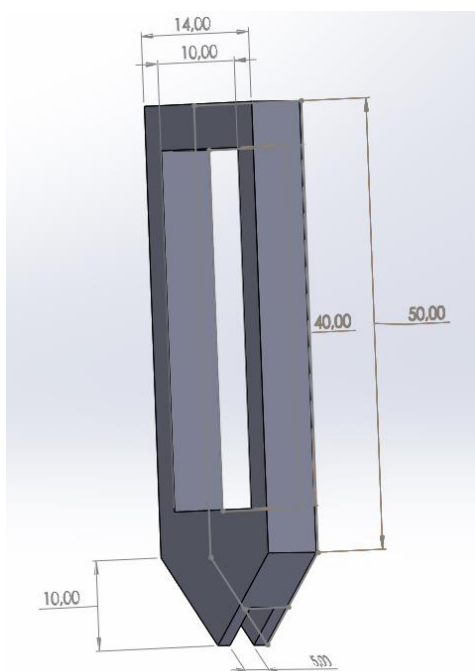
Obrázok 2.4 3D Model posuvného podstavca

### 2.1.3 Úchytka pre kalibráciu

Dutá úchytka s výrezom v ktorej bude uložený okraj šošovky. Cez jej duté telo bude prechádzať skrutka, ktorá spolu s podložkou pripevní samotnú úchytku do diery a medzi obdĺžnikové opory.



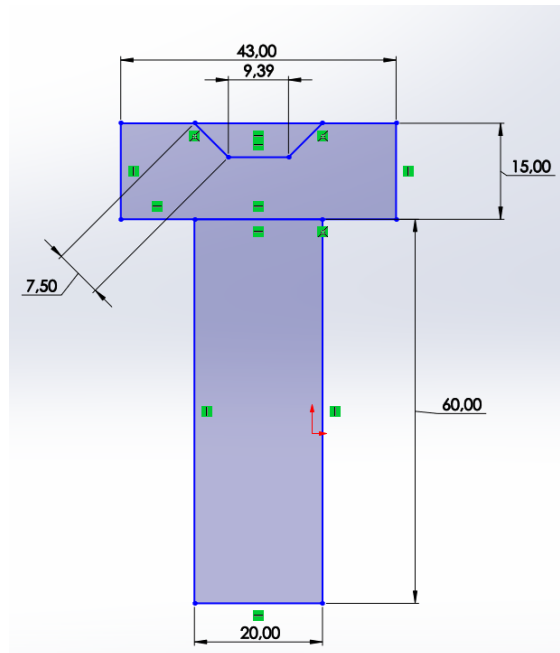
Obrázok 2.5 Návrh úchytky



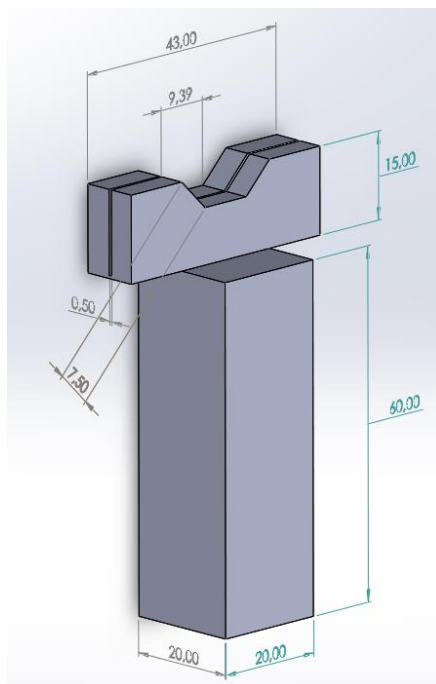
Obrázok 2.6 3D model úchytky

### 2.1.4 Držiak pre knife edge

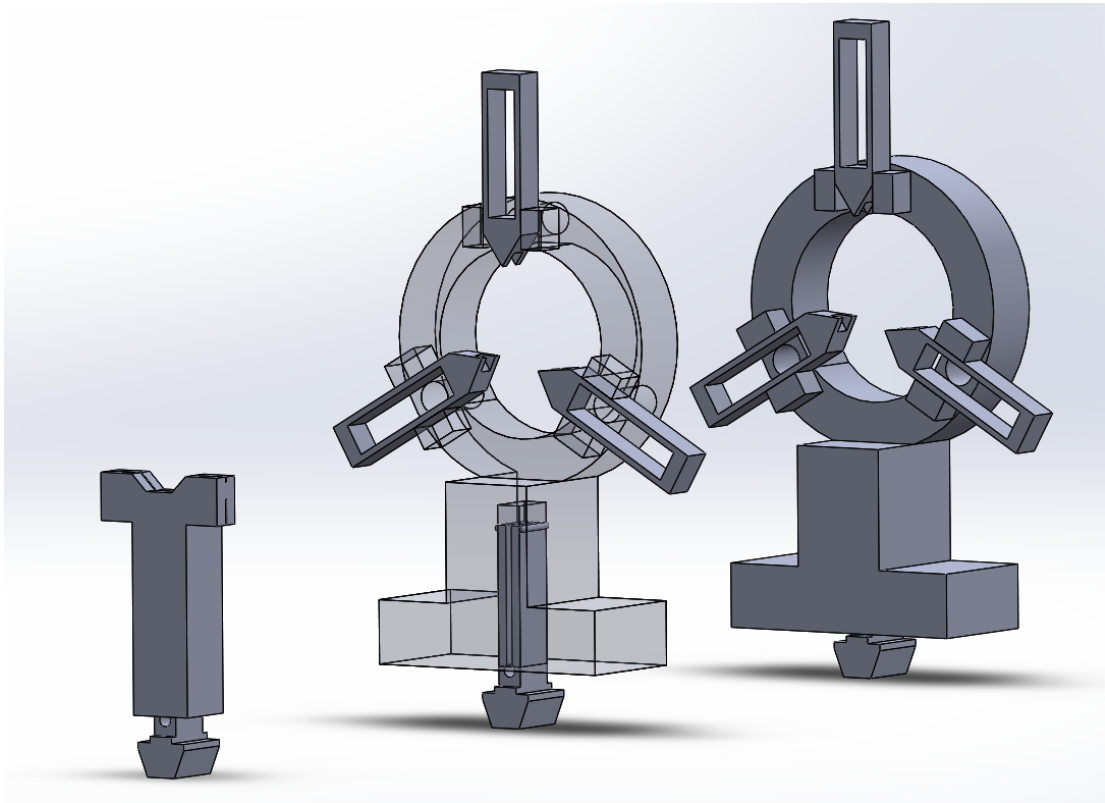
Aj pre hranu blokujúcu lúč svetla bolo potrebné navrhnuť držiak, ktorý by pasoval do profilu a bol zároveň spolu so sústavou. Teda podobne ako pre držiak šošovky bol pridaný nastaviteľný podstavec.



Obrázok 2.7 Schéma pre držiak na knife edge



Obrázok 2.8 3D model knife edge držiaky



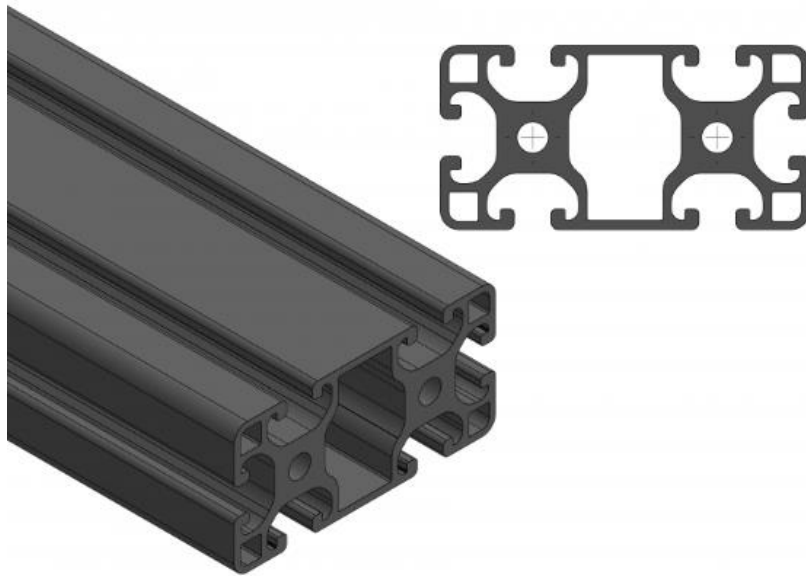
Obrázok 2.9 Finálna sústava, spolu s pohľadom na osadenie nastaviteľného podstavca

## 2.2 Konštrukcia sústav

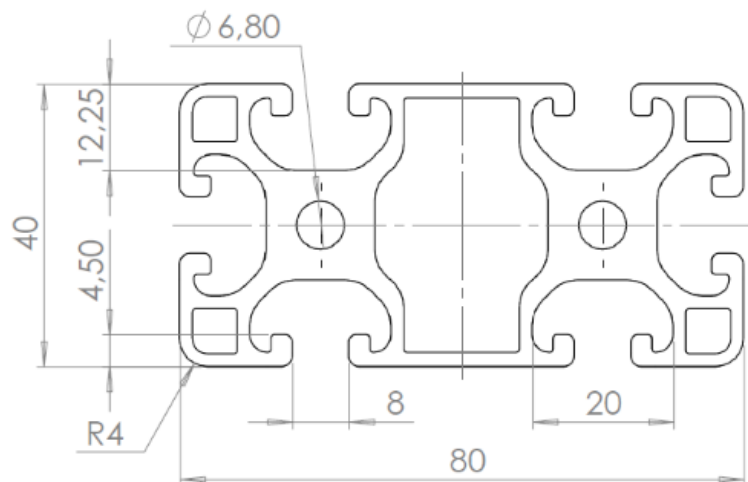
Táto kapitola popisuje výhody a nevýhody konštrukcie pre oba systémy a riešenia problémov pri návrhu a kompletizácii.

### 2.2.1 Základňa

Ako základňu využívam hliníkový profil 40x80x8 mm s dĺžkou 2000 mm pre obe sústavy. Na uchytenie držiakov optických komponentov a súčiastok som použil matice pre profily s drážkou 8 mm. Pre stojan laseru bol pridaný profil 40x40x8 mm aby sa dosiahlo stredovej osi pre svetelný lúč a jednoduchšiu kalibráciu.



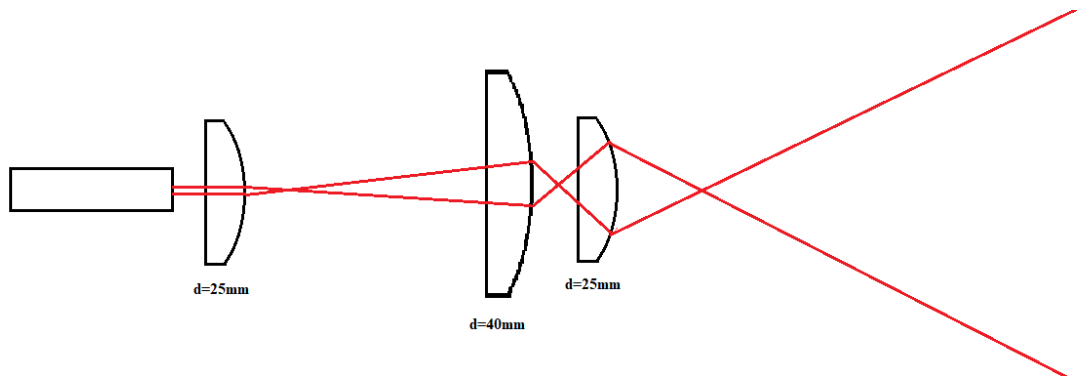
Obrázok 2.10 Hliníkový profil využívaný ako základňa sústav [30]



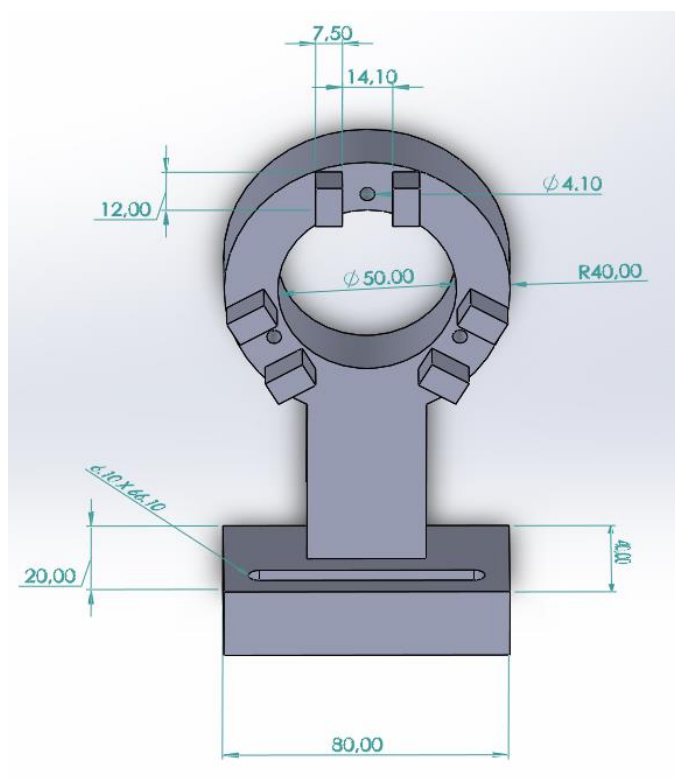
Obrázok 2.11 Rozmery profilu [30]

## 2.2.2 Rozptyl laseru

Keďže ako svetelný zdroj využívam laser s kolimovaným lúčom o priemere 0,57 mm, čo nie je vyhovujúce. Bolo potrebné priemer tohto lúča dostatočne zväčšiť, aby pokryl celý priemer využívaného optického prvku. Toho som dosiahol využitím dostupných rozptylných šošoviek, z ktorých som vytvoril sústavu o troch šošovkách v sérii, ktorá splnila zadanie a kolimovaný lúč zmenila na rozchádzajúci sa s dostatočne znásobenou veľkosťou priemeru.



Obrázok 2.12 Schéma sústavy pre zmenu kolimovaného lúča

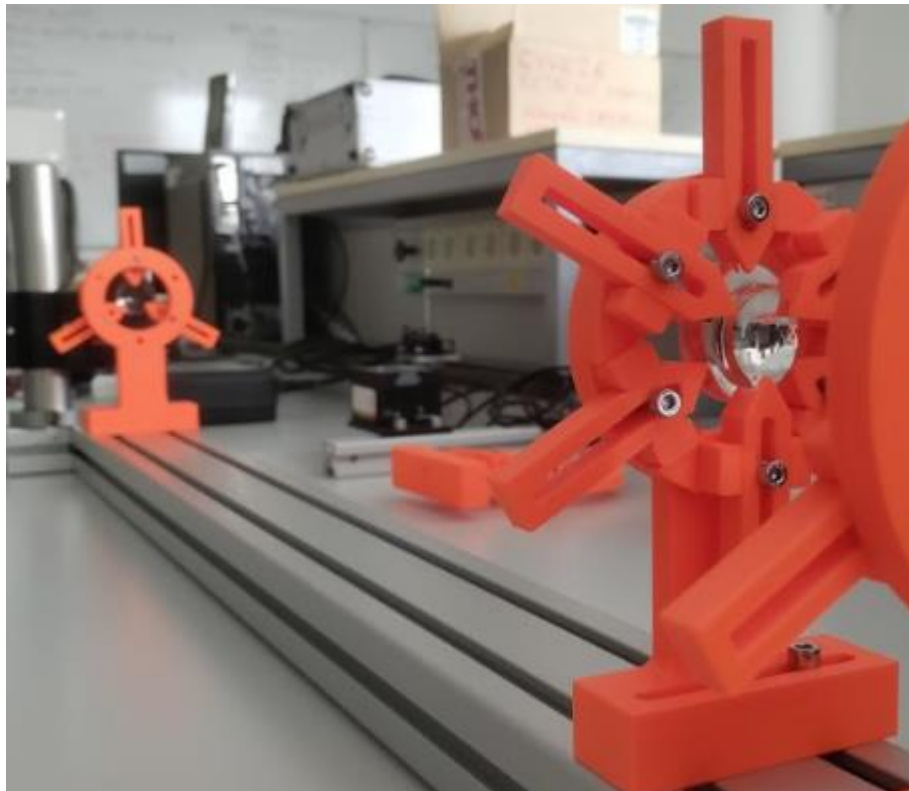


Obrázok 2.13 Návrh držiaka pre rozptylné šošovky

Pre tieto šošovky s malým priemerom bol upravený návrh držiaka 2.2, finálny návrh pre túto časť sústavy vidno na obrázku 2.13. Fyzická realizácia je viditeľná na 2.14.

Pri zostavovaní zapojenia som narazil na už známy problém citlivosti optiky aj pri malých vibráciách. Bola plánovaná možnosť nastavovania Z-osi na celej sústave pri uchytení prvkov pomocou návrhu posuvného podstavca 2.4. Daného riešenia som sa vzdal, aj keď kvalita vytlačených komponentov bola na vysokej úrovni, manipulácia a stabilita nezodpovedali presnosti daného systému. Pridal som drážku na uchytenie a lepšiu možnosť nastavovania po osi x a y.

Realizácia bola riešená párom stojanov, prvý stojan s uloženou šošovkou priemeru 25 mm bol vzdialený od zdroja svetla 10 mm pre čo najskorší rozbeh lúča. Zatiaľ čo držiak číslo 2 bol vo vzdialenosti 500 mm od prvého. Zároveň najlepší efekt rozptylu som získal uložením šošoviek tesne za sebou do jedného stojanu načo bolo potrebné jemne modifikovať návrh. Tento výsledok bol dosiahnutý z dôvodu veľmi malej ohniskovej vzdialenosti plocho-konvexnej šošovky s priemerom  $d=40\text{ mm}$ . Čo v realite znamená, že ohniskový bod bol tesne za šošovkou a za týmto bodom už bol dosiahnutý dostatočný rozptyl, ktorý bol ešte znásobený poslednou šošovkou v sérii.

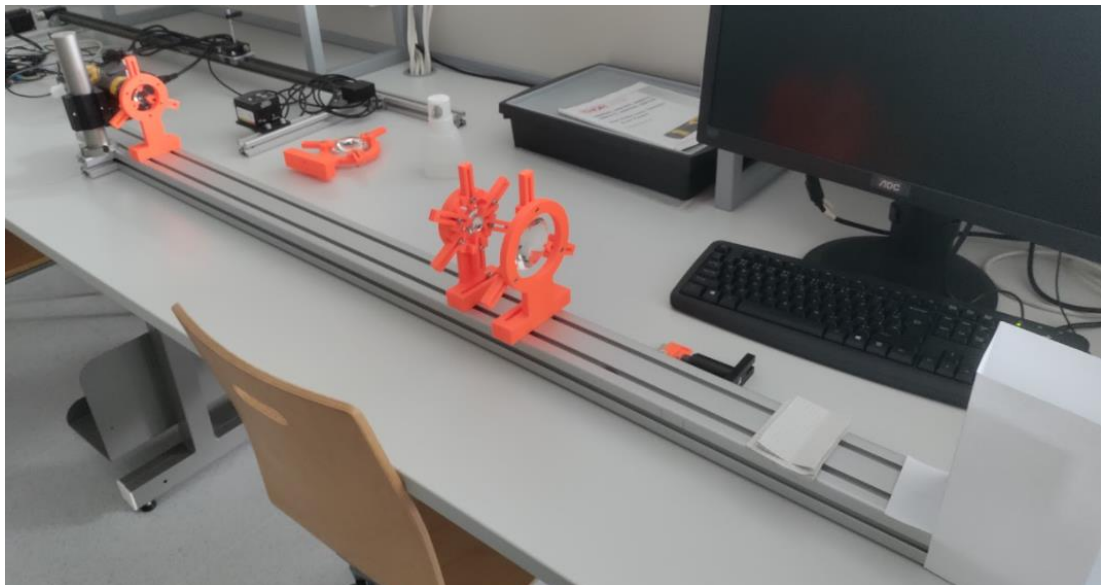


Obrázok 2.14 Fyzické riešenie sústavy

### 2.2.3 Toeplerova sústava – šošovky

Sústava s dvomi šošovkami je daná schémou, ktorá je znázornená na obrázku 1.1. Keďže už bol dosiahnutý rozptyl lúča zostávalo mi osadiť šošovky, v ktorých priestore budem vizualizovať schlieren jav. Medzi týmito šošovkami by mala nastať znova kolimáciu už rozptýleného lúča. Toto som dosiahol postupným ladením a posúvaním šošovky L1 po základni a sledovaním, či sa lúč rozbieha ďalej. Šošovku L1 som umiestnil 40 mm od poslednej šošovky pre rozptyl, obrázok 2.15. Nasledovalo pridanie L2 do vzdialenosti 300 mm od L1 a vycentrovanie sústavy.

Po skompletizovaní som si všimol zdvojenie obrazu a to bolo spôsobené tým, že šošovka L1 bola otočená rovnou stranou ku rozptylnej sústave, toto malo za následok odrazenie časti dopadajúcich lúčov späť a znova vrátenie na šošovku L1, čím sa vytváral efekt zdvojenia. Po otočení L1 tento nežiadúci jav zmizol a pokračoval som s nastavením filtra na blokovanie polovice lúčov. „Zrezanie“ lúčov pomocou knife edgu, v mojom prípade žiletku bolo potrebné umiestniť do ohniska šošovky L2. Vzdialenosť umiestnenia žiletky vyšla 65 mm od šošovky L2. Tesne za ohniskom, teda v mieste pridania žiletky, bol nastavený fotoaparát pre vizualizáciu schlieren javu.

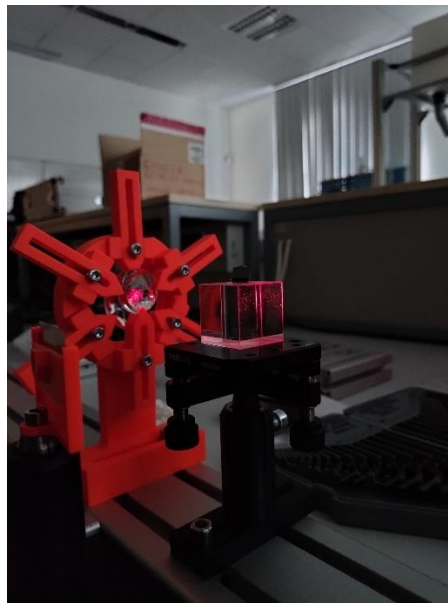


Obrázok 2.15 Ladenie Toepler sústavy

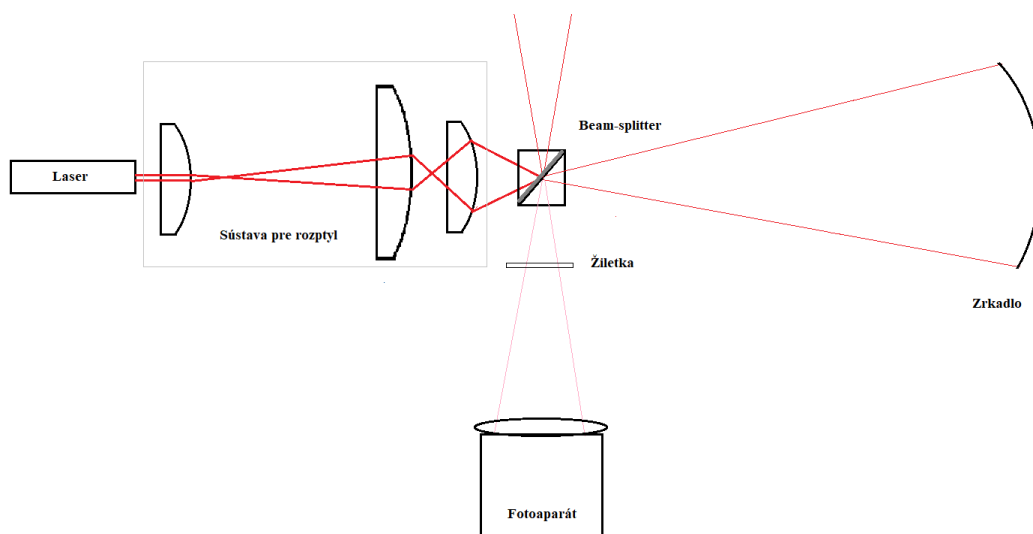
## 2.2.4 Systém s jedným zrkadlom

Pri tejto sústave bola takisto využitá základňa spolu so sústavou pre rozptyl. Ako optický prvok pre vytvorenie schlieren javu bolo použité sférické konkávne zrkadlo s priemerom 80 mm. Potreboval som zároveň aj jeho ohniskovú vzdialenosť, ktorá vyšla 480 mm.

Táto sústava sa odlišovala aj využitím beam-splittera 2.16, polarizačného kockového rozdeľovača lúčov, ktorý síce odobral polovicu intenzity svetla, ale zabránil off-axis aberácii a zároveň presmeroval výsledný efekt do fotoaparátu, ktorý nemohol byť na jednej osi ako to bolo u Toepler metódy. Beam splitter bol umiestnený práve v ohnisku poslednej šošovky rozptylnej sústavy.



Obrázok 2.16 Nastavenie beam-splittra



Obrázok 2.17 Schéma zapojenia pre systém s jedným zrkadlom

Zapojenie bolo realizované podľa schémy viditeľnej na obrázku 2.17. Musela byť dodržaná podmienka dvojnásobnej ohniskovej vzdialenosti zrkadla od beam-splittra. Čo znamenalo, že zrkadlo som umiestnil vo vzdialenosti 960 mm. Následne som opatrne doladil všetky komponenty aby laser prechádzal bez rušenia alebo skreslenia. Zostávalo nastaviť ako, pri prvej sústave už len žiletku. V tomto prípade nastavenie muselo prebehnúť do ohniska vracajúcich sa lúčov zo zrkadla zrazených mimo osi za beam-splittrom. Fotoaparát som uchytil na statív aby sa ľahšie manipulovalo pri nastavení snímaného obrazu. Realizácia je vidieť na obrázku 2.18 nižšie.



Obrázok 2.18 Realizovaná konštrukcia systému s jedným zrkadlom

### 2.2.5 Sústava na zobrazenie akustických vln

Pre vizualizáciu akustických vln bolo potrebné navrhnuť ešte stojan pre sklenú dosku, od ktorej sa budú zvukové vlny, generované piezoelektrickým budičom odrážať späť. Toto nastavenie je dôležité pre vytvorenie tlakových pásiem a následne možnosť vizualizovania levitácie polystyrénových guľčiek. Je potrebné veľmi citlivé nastavenie a to z dôvodu, že stojatá vlna medzi reflektorom, v mojom prípade sklenou doskou, a budičom nastane iba v prípade, že vzdialenosť medzi nimi je násobok polovice vlnovej dĺžky.

Po dohode s vedúcim práce som usúdil, že bude vhodné využiť programovo ovládanú motorizovanú plošinu. Mal som k dispozícii ovládač krokového motora značky Standa 8SMC1 USB FH – B1-1, plošinu Standa 8MT167-100C28, uhlovú konzolu 2AB167-50. Vytvoril som z týchto súčiastok motorizovaný držiak, obrázok 2.19. Kalibrácia bola možná cez notebook a program SMCView, ktorým som ovládal vertikálny posuv uchytenej sklenej platne.

Zdrojom akustických vln bol 28kHz piezoelektrický budič, ktorý generoval ultrazvukové vlny. Bol napájaný do zosilňovačom Brüel & Kjaer Type 2732. Vstupný signál bola sínusová vlna z generátora Picotest. Ako merací prístroj bol použitý osciloskop modelu Sigilent SDS 1102X+.



Obrázok 2.19 Sústava pre vizualizáciu stojatej vlny

## 2.3 Dosiahnuté výsledky

Po skompletizovaní konštrukcií som sa pustil do testovania vybraných javov. Práca mala byť o vizualizácii akustických polí, ale vďaka schlieren efektu dokážem zobrazit' toho oveľa viac. Testované boli bežné veci v prostredí ako napríklad plameň sviečky, prúdenie vzduchu v miestnosti ako aj plynu zo zapaľovača alebo výdych človeka, taktiež variácie teplého a studeného vzduchu v prostredí.

Pre vzduch a iné plyny platí vzťah medzi indexom lomu a hustotou plynu:

$$n - 1 = kp \quad (1.6)$$

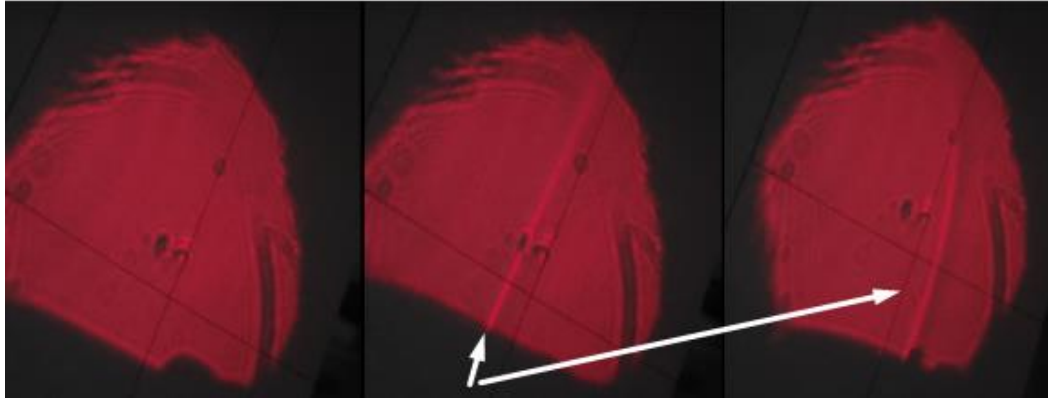
kde  $k$ , Gladston-Dale koeficient, je rovný okolo  $0.23\text{cm}^3/\text{g}$  pre vzduch v štandardných podmienkach. Pre ostatné plyny tento koeficient rovná sa v rozmedzí  $0.1 - 1.5\text{cm}^3/\text{g}$ . Zmeny indexu lomu sú pri plynoch veľmi malé, nastávajú až na treťom alebo štvrtom desatinnom mieste. Pre príklad uvediem vzduch, ktorý v mojich testoch hrá najdôležitejšiu úlohu, hodnota indexu lomu pri presvietení svetlom o vlnovej dĺžke  $633\text{nm}$ , teplote  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , tlaku  $101.325\text{ kPa}$  a vlhkosti vzduchu  $50\%$  sa  $n=1.000271$ , pri hodnote  $40\text{ }^\circ\text{C}$  a za rovnakých podmienok sa rozdiel medzi týmito hodnotami rovná takmer nepatrnej zmene  $\Delta n = 0,000018$ . Ako je viditeľné z rovnice (1.6) index lomu  $n$  je len slabo závislý od hustoty  $p$ . Zmena hustoty vzduchu v dvoch rádoch spôsobí iba  $3\%$  zmenu  $n$ . Refraktivita plynu  $n-1$ , závisí od zloženia, teploty, hustoty a vlnovej dĺžky osvetlenia. Pre vizualizáciu takých malých zmien potrebujeme veľmi citlivú optiku.

Špecifické kamery alebo výrobcovia objektívov, na zachytenie týchto javov nie sú dôležité. Avšak pre dostatočne dobré zachytenie výsledných efektov je vhodné využívať objektív s veľkou ohniskovou vzdialenosťou.

### 2.3.1 Vizualizácia Toepler metódou

Avšak pri Toepler metóde som narazil na zásadný problém s citlivosťou realizovanej sústavy. Vybrané šošovky mali priemer  $65\text{ mm}$  a zároveň ohnisková vzdialenosť bola tak isto  $65\text{ mm}$ . Po dosadení do rovnice (1.2) znamenalo, že  $f$ -number vyšlo len  $f/1$ , čo pre túto sústavu nie je ideálne. Pomocou tejto sústavy som aj vďaka tejto chybe dokázal vizualizovať tok butánu zo zapaľovača vo vzduchu, obrázok 2.20. A to z dôvodu, že index lomu pre bután sa rovná  $n=1.3326$ , čiže oproti vzduchu je to rozdiel v desatinách, čo sa v týchto meraniach rovná dostatočne veľkému rozdielu. A teda aj šošovky nie, práve vhodné pre tento systém, dokážu vizualizovať schlieren jav pri veľkom rozdiely indexov lomov. Miesto žiletky pre blokovanie lúčov a tým vytvorenie tmavších a svetlejších miest pre vizualizáciu bol použitý dierkový filter. Preto tvar zobrazovacieho priestoru presne neopisuje tvar šošovky. Ďalej je možné vidieť tmavé škvrny v priestore pre vizualizáciu, sú to drobné poškodenia alebo nedostatky šošoviek. Iné z vybraných javov sa na tejto sústave už nepodarilo vizualizovať. Nastavenie sústavy bolo teda správne aj preto je možné odhadnúť, že pri využití vhodných šošoviek s vyššou kvalitou by táto sústava bola plne hodnotná pre túto prácu.

Výhodou by oproti sústave s jedným zrkadlom bola jednoduchšia manipulácia a kalibrácia pre jej veľkosť. Nevýhodou je však cena kvalitných komponentov, šošovky by mali takisto spĺňať korekcie sférickej ako aj chromatickej aberácie. Pre ideálne výsledky by mali byť v medzipriestore šošoviek, v ktorom skúmame daný jav, paralelné lúče podľa obrázka 1.15.

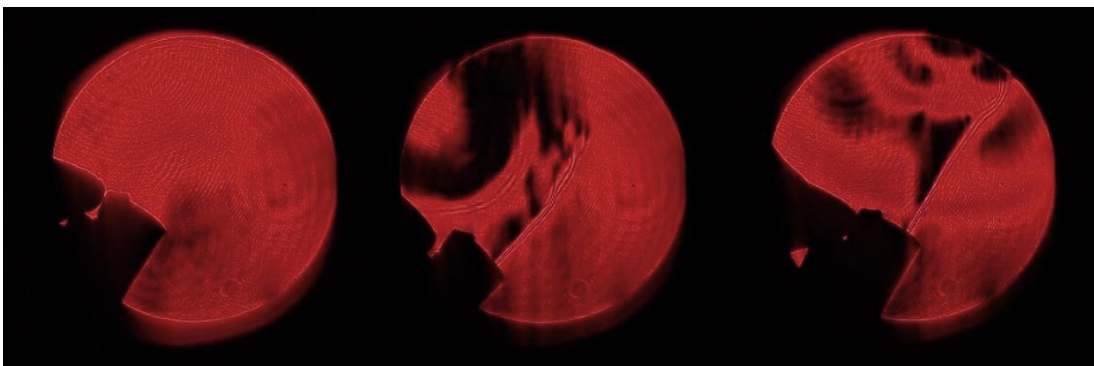


Obrázok 2.20 Tok a prúdenie butánu vo vzduchu pomocou Toepler sústavy

### 2.3.2 Vizualizácia pomocou sústavy s jedným zrkadlom

Zrkadlo využité pri tejto sústave malo viacnásobne vyššiu kvalitu ako šošovky z predchádzajúcej metódy a z daného dôvodu som dokázal vizualizovať podstatne viac javov. Výpočtom (1.2) som zistil f-number, ktoré pre zrkadlo o priemere 80 mm s ohniskovou vzdialenosťou vyšlo  $f/6$ . Čo je aj podľa literatúry minimálna presnosť potrebná pre správnu vizualizáciu schlieren efektu.

Pri porovnaní obrázkov 2.20 a 2.21 je jasne vidieť rozdiely medzi kvalitou realizovaných sústav. Na obrázku 2.21 je omnoho lepšie viditeľné prúdenie butánu a zároveň kvalita výsledného obrazu. Kontrast takto viditeľného schlieren efektu je vytvorený správnym nastavením knife edgu, teda blokáciu cca 50% lúčov v ohnisku odrazeného svetla.



Obrázok 2.21 Tok a prúdenie butánu vo vzduchu zobrazený pomocou sústavy s jedným zrkadlom

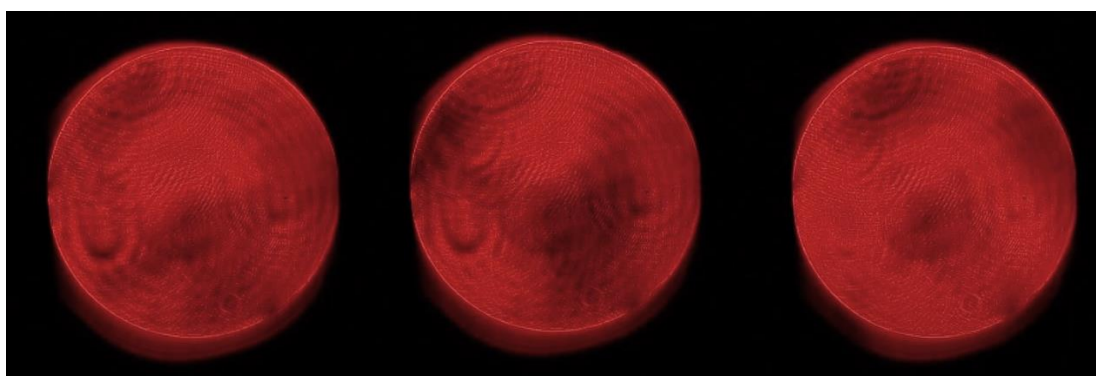
Sústava s takto presným zrkadlom bola schopná vizualizovať aj rádovo menšie rozdiely indexu lomu. Dokonca bolo možné sledovať prúdenie vzduchu v okolí zrkadla bez žiadneho zásahu. To znamená, že sústava reagovala aj na malé zmeny teploty vzduchu. Tento efekt bolo zaujímavé sledovať ale zároveň pri skúmaní iných javov, to bol rušivý element. Dôkladnejšie je to vidieť práve na priložených videách.

V miestnosti, kde prebiehalo meranie bola teplota 23,4 °C, to však neznamená, že bola konštantná po celej miestnosti. Teplota vzduchu sa pohybuje v určitom rozmedzí a to práve je viditeľné na obrázku 2.22, ako sa tmavšie škvrny, vyjadrujúce rozličné teplotné porovy vzduchu premiestňujú popri skúmanej oblasti. Ak zoberiem do úvahy, že teplota sa mohla líšiť  $\pm 0,05$  °C, tak rozdiel indexu lomu týchto teplôt bude daný ako:

$$n_{23,4^{\circ}\text{C}}=1,000268155 \quad n_{23,35^{\circ}\text{C}}=1,000268202$$

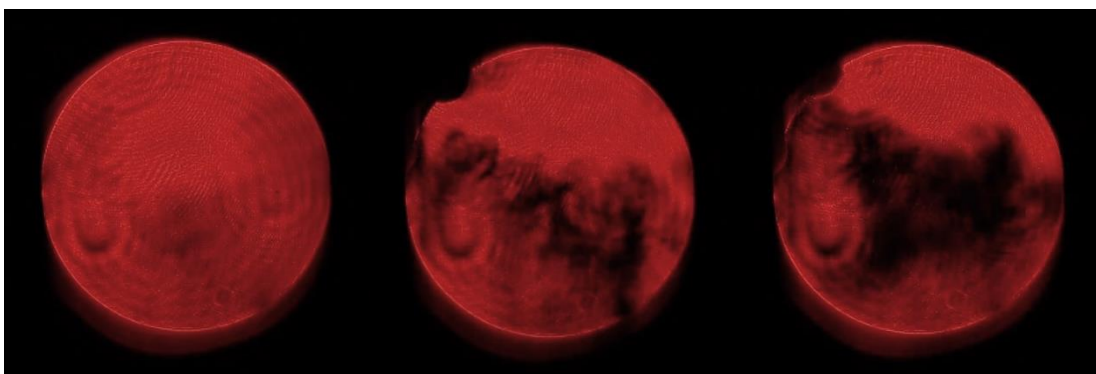
$$\Delta n = n_{23,35^{\circ}\text{C}} - n_{23,4^{\circ}\text{C}}$$

$$\Delta n = 4,7 \cdot 10^{-8}$$



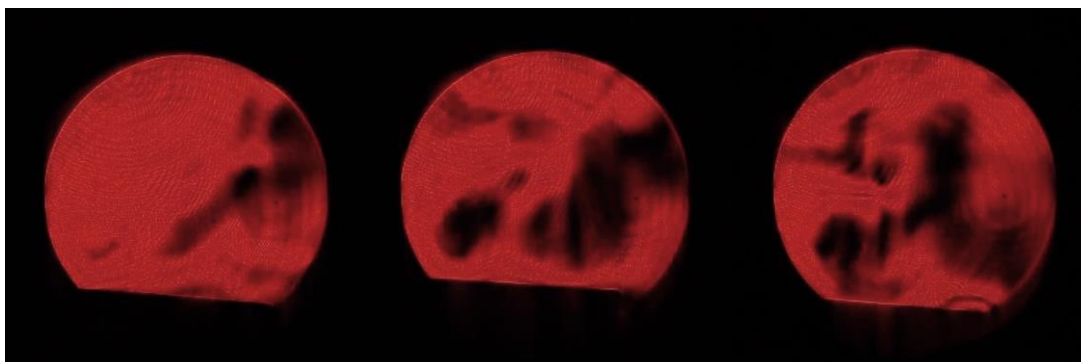
Obrázok 2.22 Zmeny prúdenia vzduchu vyjadrené pohybom tmavších oblastí

Dokázanie vizualizácie takto nízkeho rozdielu indexu lomu, ma posunulo bližšie ku realizácii a pokusu zobrazenia stojatej vlny a levitácie guľičiek. Ešte predtým som sa však pokúsil vizualizovať ďalšie javy. Aj z dôvodu prebiehajúcej pandémie ma zaujímalo, ako sa šíri ľudský výdych. Na obrázku 2.23 je možné vidieť šírenie takto vydýchnutého vzduchu.

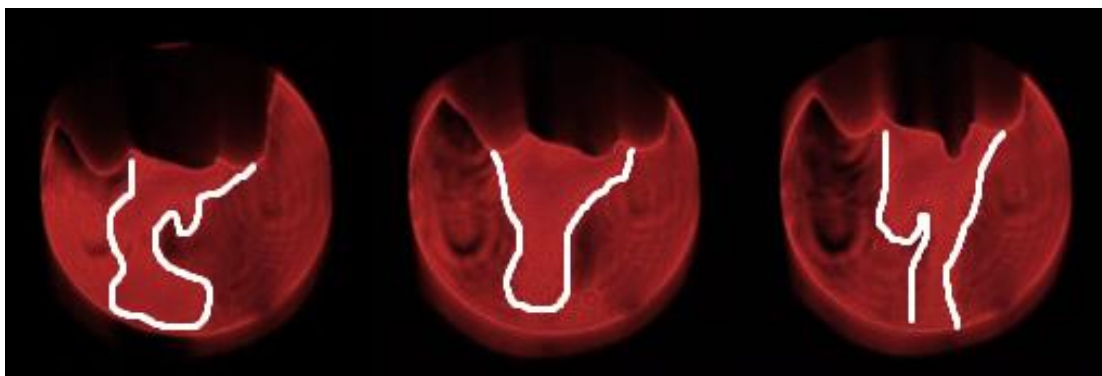


Obrázok 2.23 Vizualizácia ľudského výdychu

Ako ďalší jav som porovnával vizualizáciu a prúdenie teplého a studeného vzduchu pomocou schlieren metódy. Tento jav je vhodný na vysvetlenie využitia knife edgu v schlieren metóde. Studený vzduch má väčšiu hustotu ako vzduch pri izbovej teplote a svetlo prechádzajúce cez neho sa zlomí vo väčšom uhle a vyhne sa žiletke-filtru, a teda môže osvietiť obrazovku až 100% intenzitou a tým vytvorí jasnejšiu časť. Na obrázku 2.25 je tento jav viditeľný ako najjasnejšie prúdy obrazu orámované bielou farbou. Lúče laseru, ktoré prechádzajú vzduchom o izbovej teplote sa vyfiltrujú a intenzita dopadajúcich lúčov je okolo 50%. Vytvárajú kontrast medzi úplne prepustenými lúčmi alebo zablokovanými. Obrázok 2.24 zase popisuje vloženie pohára s horúcou vodou pred zrkadlo, teplý vzduch je viditeľný ako tmavé časti obrazovky pri vizualizácii. Je to spôsobené prechodom svetla cez menej hustý teplý vzduch, vďaka čomu sa lúče zrazia menej a po odraze dopadajú na žiletku, a tým vytvárajú tieň alebo inak šmuhy, čo v preklade do nemčiny znamená schliere, podľa čoho bol tento jav pomenovaný.



Obrázok 2.24 Prúdenie teplého vzduchu nahor



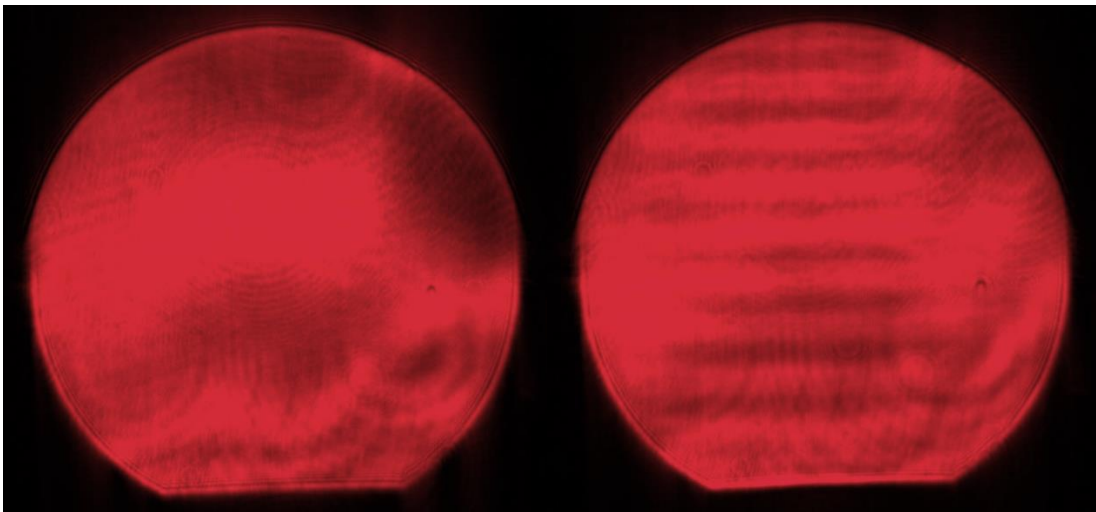
Obrázok 2.25 Prúdenie studeného vzduchu uvoľňujúceho sa z kocky ľadu smerom nadol

### Vizualizácia stojatej akustickej vlny

Keďže zvukové vlny sú tlakové vlny a zmeny tlaku vyúsťujú v gradienty hustoty, nastáva otázka či je možné vizualizovať tieto zvukové vlny.

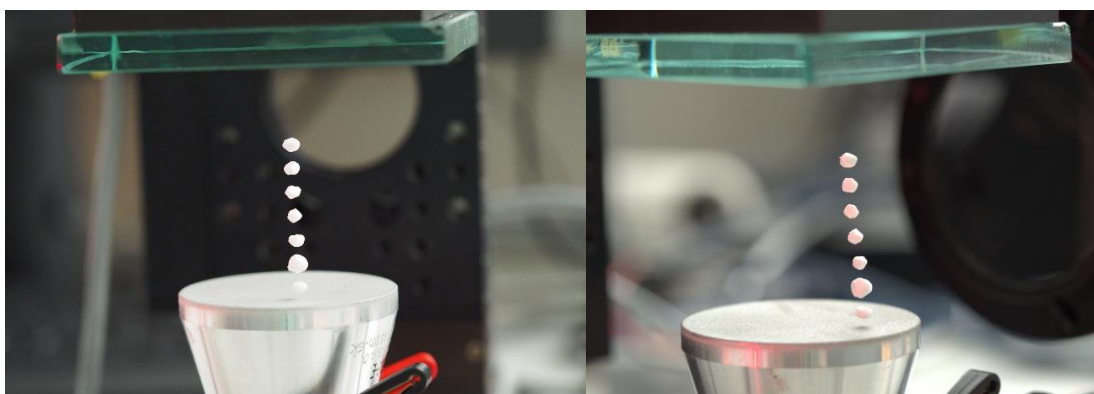
Ultrazvukový budič bol postavený pred zrkadlo napájaný zo zosilňovača a vstupný signál bola generovaná sínusová vlna o frekvencii 27690,80Hz a amplitúde 400mV zo zdroja. Pre levitáciu je potrebné minimálne napätie aspoň 50Vp-p, budič pracoval pri napätí = 77,6Vp-p.

Ultrazvukové vlny sa javia ako pásy svetla po šírke zrkadla tento jav je viditeľný na obrázku 2.26. Zachytený obraz na ľavej strane zobrazuje plochu zrkadla pri vypnutom budiči. Druhá časť obrázka vizualizuje zobrazenie vln po zapnutí budiča.



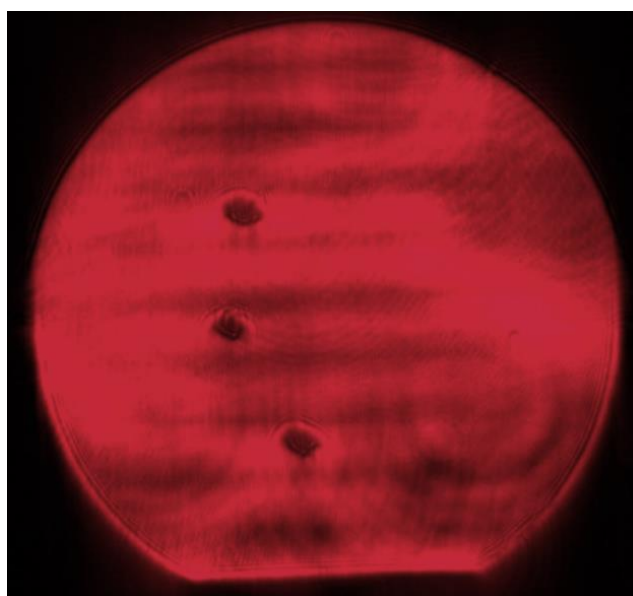
Obrázok 2.26 Vizualizácia stojatej vlny

Tieto zvukové vlny idú smerom nahor, zatiaľ čo nad budičom je umiestnená odrazová doska zo skla, ktorá ich reflektuje späť dolu. Citlivým nastavením vzdialenosti medzi odrazovou doskou a budičom som dosiahol toho, že vlny odrazené a vracajúce sa späť od sklenej dosky sa budú miešať so stúpajúcimi vlnami nahor. Táto vzdialenosť musí byť celočíselným násobkom polovičnej vlnovej dĺžky. A tým sa vytvorí regióny vysokého a nízkeho tlaku, ktoré sa nehýbu a sú v jednom mieste. V týchto zónach vysokého tlaku som sa pokúsil uviesť polystyrénové guľičky do stavu levitácie, vďaka dostatočnému napätiu a nastaveniu odrazovej dosky bol výsledný efekt dosiahnutý ako je vidieť na obrázku číslo 2.27. Tento jav teda „zmrazí“ stojaté vlny. Pri „zmrazení“ som zmeral pravítkom vlnovú dĺžku, ktorá v tomto prípade bola 12 mm. Z čoho viem, že pre správne nastavenie tohto systému a teda pre zväčšenie a lebo zmenšenie oblasti, v ktorej pozorujem stojatú vlnu bude potrebné nastavovať odrazovú dosku v násobkoch práve tejto hodnoty.

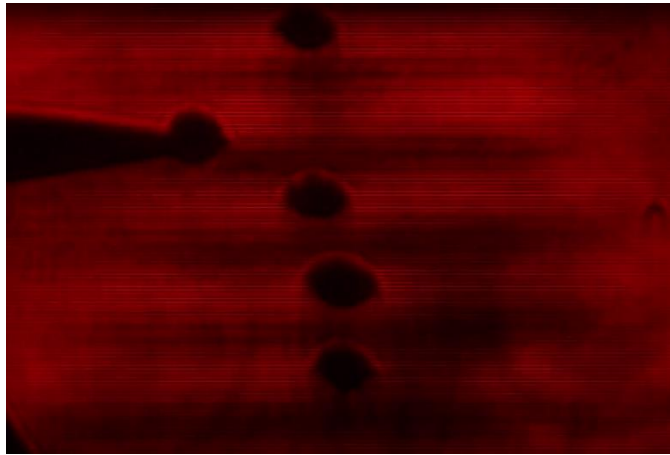


Obrázok 2.27 Levitácia polystyrénových guľôčiek

Najväčší tlak je hneď pod úrovňou dosky a to je dôvod, podľa ktorého dokážem určiť, že práve jasnejšie pásy sú oblasťami vysokého tlaku. Skutočnosť, že jasný pás svetla je hneď po odrazovú doskou je v súlade s predpokladom, že pásy svetla zodpovedajú zmenám hustoty vzduchu. Vzduch v blízkosti povrchu platne podlieha maximálnej zmene hustoty: kompresii, ak je tlak väčší ako atmosférický alebo zriedkavosťou opak kompresie, ak je tlak nižší. Pásma svetla sa vyskytujú pri tlakových antinódach. Jasnejšie pruhy svetla hovoria, kde je gradient hustoty vo vzduchu a jasnosť zodpovedá veľkosti gradientov. Avšak nedozvieme sa smer, teda či je hustota klesajúca alebo sa zvyšuje. Teda z jasnosti pásiem získavame skalárnu veličinu. Pre získanie vektora a teda väčšieho množstva informácií by bolo možné využiť farebné filtre, čím by sme získali smer gradientov.



Obrázok 2.28 Vizualizácia uloženia guľôčok v zónach vysokého tlaku ultrazvukových vln



Obrázok 2.29 Priblíženie vizualizácie zoradenia guľôčok v bledých pásmach vysokého tlaku ultrazvukových vln

Z výsledných obrázkov 2.28 a 2.29 je teda zrejmé, že sa podarilo vizualizovať danú problematiku aj za využitia dostupných prostriedkov. Poriadené fotografie boli upravené znížením saturácie na 66% pre lepšiu viditeľnosť skúmaných javov.

Porovnanie sústav je v tomto prípade zložitejšie, keďže Toepler sústava bola zostrojená z nie práve vhodnými optickými šošovkami. Čo malo za následok zlé výsledky tejto sústavy. Ak by boli použité kvalitnejšie šošovky je tu predpoklad, že by si tieto sústavy výsledkami konkurovali. Vizualizácia sústavou s jedným zrkadlom bola úspešná pri každom jave, ktorý som sa rozhodol vizualizovať. Ak by som mal viac času na riešenie tejto problematiky, skúsil by som vymeniť zdroj svetla, teda laser za bielu LED, ktorá by umožnila využitie farebných filtrov a tým by bolo možné sledovať ďalšie javy.

Nie všetky fotografie dokážu vyjadriť správnu reprezentáciu schlieren efektu. Pre lepšiu predstavu toku tekutín sú priložené videá skúmaných javov v prílohe A2. V nahraných videách som tiež editoval saturáciu pre zlepšenie viditeľnosti schlieren javu.

### 3 ZÁVER

Základným cieľom tejto bakalárskej práce bolo pochopenie princípov a usporiadania schlieren zobrazovacej techniky a návrh takéhoto systému pre vizualizáciu akustických polí.

Teoretická rešerše bola prevedená v prvej kapitole. Bola rozdelená na štyri podkapitoly. V prvej podkapitole boli popísané základné optické javy, dôležité pre pochopenie funkcie schlieren techniky.

Druhá podkapitola približuje bližšie históriu, využitie a teóriu princípu schlieren metódy. Ďalej sú v nej opísané najčastejšie možnosti konštrukcií a porovnanie výhod a nevýhod.

V tretej časti tejto kapitoly porovnáваме schlieren metódu s metódou shadowgraph na skúmanie nehomogénnych javov. V tejto kapitole sú opísane plusy aj mínusy a ich rozdiely.

Posledná podkapitola sa venuje využitým prvkom schlieren sústavy a ich problematike. Postupne popisuje funkciu a využitie lasera, základné typy šošoviek a zrkadiel a ich využiteľnosť v tomto systéme, nepriaznivé chyby, ktoré sa vyskytujú pri optických prvkoch ako napríklad chromatická a sférická aberácia. A posledná časť je venovaná dôležitosti filtrovania lúčov pomocou knife edge a zároveň riešeniu umiestnenia.

V druhej kapitole sa bakalárska práca venuje návrhu konštrukcie, realizácii návrhov a zhodnoteniu výsledkov. Postupne v podkapitolách rozoberá bakalárska práca 3D návrh modelov pre držiaky optických komponentov.

Ďalšia časť popisuje realizáciu konštrukcií pre vybrané sústavy, problematike pri ich vyhotovení a zlepšeniam pri opakovaní merania.

V tejto kapitole sú opísané aj dosiahnuté výsledky a porovnanie oboch sústav na základe funkčnosti a dosiahnutých výsledkov.

V sekcii prílohy sú priložené videá pre lepšie pochopenie a zobrazenie skúmaných javov.

Na záver je možné konštatovať, že vizualizácia stojatej vlny bola úspešná a boli teda splnené všetky body zadania.

## LITERATÚRA

- [1] SETTLES G. S., *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Springer, 2 ed., 2006.
- [2] DEGEN, Nicolas. *An overview on Schlieren optics and its applications* [online]. Zürich, 2012 [cit. 2021-01-03]. Working Paper. ETH-Zürich.
- [3] STOVER, John C. (1995). *Optical Scattering: Measurement and Analysis*. SPIE Optical Engineering Press. [ISBN 978-0-8194-1934-7](https://doi.org/10.1117/1.1644444).
- [4] TAYLOR H. G., WALDRAM J. M., “Improvements in the schlieren method,” *Journal of Scientific Instruments*, vol. 10, no. 12, pp. 378–389, 1933.
- [5] RICHARD H., RAFFEL M., “Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method,” *Measurement Science and Technology*, vol. 6, pp. 1576–1585, 2001.
- [6] SCHRADIN H., “Schlieren methods and their applications,” *Ergeb. Exakten Naturewiss*, vol. 20, no. 303, 1942.
- [7] SETTLES G. S., HARGATHER Michael J., 2017 *Meas. Sci. Technol.* **28** 042001
- [8] Schlieren Optics. *Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations* [online]. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/schlieren-optics>
- [9] RAFFEL M., Background-oriented schlieren (BOS) techniques. *Exp Fluids* **56**, 60 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1927-5>
- [10] MAZUMDAR, Amrita. Principles and techniques of schlieren imaging systems. 2013
- [11] MEIER G. E. A., “Computerized background-oriented schlieren,” *Experiments in Fluids*, vol. 33, no. 1, pp. 181–187, 2002.
- [12] PANIGRAHI P. K., MURALIDHAR K., Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer, SpringerBriefs in Thermal Engineering and Applied Science, DOI: 10.1007/978-1-4614-4535-7\_6
- [13] BURTON, R. A., BAILEY D. Z., BARRY F. W., I. A. deFrate, and E. P. Neumann. Optical measuring techniques. Chap. 9 of *Aerodynamic Measurements*, ed. R. C. Dean, Jr. MIT GasTurbineLab, Cambridge, MA, pp. 167-184, 1953.
- [14] SETTLES G. S., (2001) Shadowgraph Techniques. In: Schlieren and Shadowgraph Techniques. Experimental Fluid Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [15] BURTON, R. A. The application of schlieren photography in fluid flow and heat transfer analysis. M.S.M.E. Thesis, University of Texas, 1951.
- [16] DAVIS, M. R. Determination of turbulent flow properties by a penetrating beam dynamic shadowgraph method. *J. Physics E*, 20(10) :1271-1277, 1987.
- [17] DAVIS, M. R. and H. L. Li. Evaluation of fractal dimension for mixing and combustion by the schlieren method. *Expts. Fluids*, 21(4) :248-258, 1996.
- [18] Supersonic Bullet. NASA [online]. 2007, 08.15.2007 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/galex/20070815/f.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/galex/20070815/f.html)

- [19] OPPENHEIM, A.K., P.A. URTIEW a F.J, WEINBERGT. *On the use of laser light sources in schlieren interferometer systems*. University of California, USA, 1966.
- [20] THORLABS. *Red HeNe Laser Systems (Low Power): Operating Manual* [online]. 2010, 31.8.2010 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/12d3c4af92288755-FE54978E-C5C2-7294-020766F35846DC61/HRR015-Manual.pdf>
- [21] TOEPLER, A. Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode - Ein Beitrag zur Experimentalphysik. M. Cohen & Son, Bonn, 1864.
- [22] TOEPLER, A. Optischen Studien nach der Methodeder Schlierenbeobachtung. *Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie*, 131:33-55, 1867.
- [23] Lens. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lens>
- [24] Chromatic aberration. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Chromatic\\_aberration](https://en.wikipedia.org/wiki/Chromatic_aberration)
- [25] Spherical aberration. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical\\_aberration](https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_aberration)
- [26] Schlieren Imaging in Color. *TheAwesomer* [online]. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://theawesomer.com/schlieren-imaging-in-color/448086/>
- [27] *An overview on Schlieren optics and its applications: Studies on mechatronics* [online]. 14 July 2012 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010208451>
- [28] JOSHTHEENGINEER. *Schlieren Mirrors: Spherical vs. Parabolic [video]*. [online]. 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=ntIsm2AVuj4&list=PLV1OtgWOLFNNhdCOQ\\_WHy8lN8\\_ORQ3yId&index=15&ab\\_channel=JoshTheEngineer](https://www.youtube.com/watch?v=ntIsm2AVuj4&list=PLV1OtgWOLFNNhdCOQ_WHy8lN8_ORQ3yId&index=15&ab_channel=JoshTheEngineer)
- [29] KARTHICK S.K., RAJITHA P.R., JANARDHANRAJ S., KRISHNAY., JAGADEESH G. (2019) PLIF-Based Concentration Measurement of OH Behind the Blast Wave Emanating from an Oxyhydrogen Detonation-Driven Shock Tube. In: Sasoh A., Aoki T., Katayama M. (eds) 31st International Symposium on Shock Waves 1. ISSW 2017. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91020-8\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91020-8_26)
- [30] Hliníkový profil 40x80x8mm. *Linearnatechnika* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://linearnatechnika.sk/hlinikove-profily-drazka-8mm/519-hlinikovy-profil-40x80x8mm>

## Zoznam Symbolov a skratiek

### Skratky:

LS	Light Source / zdroj svetla
L1	Lens 1 / šošovka 1
L2	Lens 2 / šošovka 2
KE	Knife Edge / hrana ostria noža
C	Camera / Kamera
S	Schliere
PM1	Parabolic mirror 1 / Parabolické zrkadlo 1
PM2	Parabolic mirror 2 / Parabolické zrkadlo 2
SG	Source Grid / Mriežka
FL	Fresnel Lens / Fresnelova šošovka
SL	Schlieren Lenses / Schlieren šošovky
CG	Cutoff Grid / Mriežka blokovania
RL	Relay Lens / Prevodová šošovka
HeNe	Heliúm-neón
BOS	Background oriented schlieren
LED	Light-Emitting Diode / Luminiscenčná dióda

### Symboly:

$n$	Index lomu
$c$	Rýchlosť svetla
$v$	Fázová rýchlosť
$f$	Ohnisková vzdialenosť
$R_1$	Polomer zakrivenia povrchu šošovky bližšie k zdroju svetla
$R_2$	Polomer zakrivenia povrchu šošovky ďalej od zdroju svetla
$d$	Hrúbka šošovky

# SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - SEZNAM PŘÍLOH NA PŘILOŽENÉM CD .....	59
--	----

## **Příloha A - Seznam příloh na přiloženém CD**

**A.1 Zložka s textom práce**

**A.2 Zložka s videami vizualizovaných javov**